

Universidade Nova de Lisboa

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Sistema de Monitorização de Condições Meteorológicas
e Correlação com Produção Renovável de Energia

Por:

Marcos André Gomes Dias Afonso

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Doutor João Francisco Alves Martins

Co-orientador: Engenheiro Pedro Miguel Ribeiro Pereira

Lisboa

2010

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Doutor João Martins e ao Engenheiro Pedro Pereira por todo o apoio e constante orientação durante a preparação e desenvolvimento da Dissertação e por todo o conhecimento transmitido.

Gostaria de agradecer a todos os meus colegas e amigos da FCT-UNL, nomeadamente ao “núcleo duro”, com quem tive o prazer de trabalhar e partilhar vivências durante uma importante fase da minha vida: Gonçalo Luís, Pedro Magalhães, David Gomes, João Gil, Tiago Fonseca, Ricardo Gomes, Rúben Lino, Victor Nunes e Francisco Ganhão.

Agradeço à minha namorada Sara pelo constante apoio, incentivo e carinho.

Um especial obrigado à minha mãe, pai e irmão, por todo o apoio, preocupação, afecto e atenção, agora e sempre.

Resumo

A sustentabilidade da Humanidade em diversas áreas, tem sido assegurada pelo uso de combustíveis fósseis como principais fontes energéticas. Devido ao aumento exponencial do consumo energético e consequente diminuição destes recursos surgiu a necessidade de encontrar fontes de energia alternativas. Os avanços tecnológicos na área de produção de energia eléctrica a partir de recursos renováveis têm permitido a instalação destes sistemas um pouco por todo o Mundo. O elevado custo associado à instalação destes sistemas representa ainda uma barreira comercial sendo fundamental a sua optimização. Para tal, é necessário um conhecimento sobre as condições meteorológicas e parâmetros energéticos destes sistemas, no local de instalação.

O trabalho proposto nesta Dissertação incide sobre o desenvolvimento de um sistema que interligue dados sobre as condições meteorológicas e parâmetros energéticos de sistemas de produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis. A realização deste trabalho permitiu a implementação de um sistema capaz de adquirir continuamente dados sobre a velocidade e direcção do vento, temperatura ambiente e radiação solar, e ainda parâmetros energéticos de um, ou vários, sistemas de produção de energia a partir de fontes renováveis. Para a validação da aplicação desenvolvida, foram analisados os dados de produção de um gerador eólico e um conjunto de painéis fotovoltaicos instalados no Departamento de Engenharia Electrotécnica da Faculdade de Ciências e Tecnologia. A aplicação desenvolvida na presente Dissertação permite, para além da aquisição de dados meteorológicos e energéticos, a sua monitorização e correlação através de uma interface gráfica simples e atractiva, facultando uma fácil interactividade com o utilizador.

Abstract

The Mankind sustainability in many areas has been assured by the use of fossil fuels as primary energy sources. Due to the exponential increase of energy consumption and consequent decline in these resources, the necessity of finding alternative energy sources started to gain importance. Technological advances in the production of electricity from renewable resources have enabled the installation of these systems all over the World. The high cost associated with installing these systems still represents a trade barrier, so their designing operational is desirable. This effort is only possible with the knowledge of weather conditions and energy parameters of these systems on-site.

The work in this Thesis focuses on developing a system that integrates information about weather conditions and energy parameters of systems of power generation from renewable sources. This work has allowed the implementation of a system able to continuously acquire data of wind speed and direction, temperature and solar radiation, and energetic parameters of one or more renewable energy systems. To validate the developed application, it was analyzed data of a wind generator and a set of photovoltaic panels installed at the Department of Electrical Engineering in Faculty of Science and Technology. The application developed in this Thesis allows, in addition to the acquisition of weather data and energy, their monitoring and correlation through a simple and attractive graphical interface, providing an easy interactivity with the user.

Índice de Matérias

Agradecimentos	III
Resumo.....	V
Abstract	VII
Índice de Matérias.....	IX
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objectivos.....	4
1.3 Estrutura da Dissertação.....	5
Capítulo 2 Energia Eólica.....	7
2.1 Formação e dinâmica do vento	7
2.2 Variabilidade do vento	10
2.3 Velocidade e direcção do vento	10
2.4 Influência da superfície terrestre no vento	14
2.5 Potência eólica disponível e utilizável	16
2.5.1 Potência disponível do vento.....	17
2.5.2 Potência útil mecânica	18
2.5.3 Coeficiente de potência	20
Capítulo 3 Energia Solar	23
3.1 Recurso Solar.....	23
3.1.1 Radiação Solar.....	24
3.2 Células fotovoltaicas	28
3.2.1 Princípio de funcionamento	28
3.2.2 Condições de referência	29
3.2.3 Circuito eléctrico equivalente simplificado.....	30
3.2.4 Características I-V e P-V	31
3.2.5 Influência da irradiância e temperatura.....	34
Capítulo 4 Medição das condições meteorológicas	37
4.1 Medição do vento.....	37
4.1.1 Velocidade do vento	38
4.1.2 Direcção do vento.....	41

4.2	Medição da radiação solar	41
4.3	Medição da temperatura	45
4.3.1	Termómetros de expansão de fluidos e bimetálicos	47
4.3.2	Termopares.....	48
4.3.3	Termorresistências e termístores	49
4.3.4	Semicondutores	50
4.3.5	Pirómetros	51
4.4	Estações Meteorológicas	52
4.5	Estado da arte.....	53
4.5.1	Sistemas de Monitorização comerciais	53
4.5.2	Sistemas de Monitorização e Correlação não comerciais	59
Capítulo 5	Sistema Desenvolvido	62
5.1	Modelo conceptual do Sistema	62
5.2	Sistemas de Produção de Energia a partir de fontes Renováveis	63
5.2.1	Gerador eólico de pequena potência	64
5.2.2	Painéis fotovoltaicos (PV).....	66
5.2.3	Aquisição de dados de Energia e Base de dados	67
5.3	Estação Meteorológica	68
5.3.1	Datalogger Em50.....	69
5.3.2	Anemómetro Davis Cup.....	74
5.3.3	Piranómetro PYR Solar Radiation.....	75
5.3.4	Termómetro ECT Temperature	77
5.3.5	Montagem do equipamento	78
5.4	Monitorização e Correlação.....	80
5.4.1	Comunicação e Aquisição de dados	82
5.4.2	Processamento de dados.....	88
5.4.3	Análise e Correlação de dados	92
5.4.4	Interface	96
Capítulo 6	Resultados Experimentais	101
6.1	Recurso eólico	101
6.2	Correlação entre Recurso eólico e Energia produzida	103
6.3	Recurso Solar.....	107
6.4	Correlação entre Recurso Solar e Energia produzida.....	108
Capítulo 7	Conclusões.....	113

Bibliografia.....	114
Anexos	117
Anexo A - Comandos de controlo do <i>Datalogger Em50</i>	117

Índice de figuras

Figura 2.1- Em altitude, a força de atrito é nula - o vento geostrófico sopra da zona de alta para baixa pressão paralelamente às isóbaras.	9
Figura 2.2 - Na superfície actua a força de atrito - o vento atravessa as isóbaras com um ângulo tanto maior quanto for a força de atrito.	9
Figura 2.3- Rosa-dos-ventos (Fonte:www.cne-escutismo.pt)	12
Figura 2.4- Velocidade direcções médias do vento (12-Abril 2010)	13
Figura 2.5- Rosa-dos-ventos com dados da direcção e velocidade do vento (12-Abril 2010)	14
Figura 2.6- Aumento da velocidade do vento com a altura, e consequentemente aumento da potência do vento (Adaptado de: United States Department of Energy)	16
Figura 2.7- Diagrama de potências envolvidas numa turbina eólica	17
Figura 2.8- Variabilidade ideal da velocidade do vento numa turbina eólica [1]	19
Figura 3.1 - Espectro Electromagnético (Fonte: Coastal Carolina University)	24
Figura 3.2 - Intensidade da radiação solar [10]	25
Figura 3.3 – Componentes da radiação solar global	26
Figura 3.4 – Irradiância média mensal num plano inclinado (38,7°) em Lisboa [16]	27
Figura 3.5 –Representação típica da radiação solar e do pico de horas de sol (PSH) para um dia limpo (Fonte: [15])	28
Figura 3.6 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica (Adaptado de: www.apec-vc.or.jp/e/)	29
Figura 3.7 – Circuito eléctrico equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica [1]	30
Figura 3.8 – Curva típica representativa de Tensão-Corrente de células fotovoltaicas [15]	31
Figura 3.9 – Curva típica representativa de Tensão-Potência de células fotovoltaicas [15]	32
Figura 3.10 – Influência da irradiância nas características I-V nas células fotovoltaicas (Fonte: [15])	34
Figura 3.11 – Influência da temperatura da célula nas características I-V nas células fotovoltaicas (Fonte: [15])	35
Figura 4.1 – Anemómetro de copos (Fonte: www.sciencescope.co.uk)	38
Figura 4.2 – Anemómetro direcciona (Fonte: www.nssl.noaa.gov)	39
Figura 4.3 – Anemómetro 2-D capaz de medir a velocidade e direcção do vento (Fonte: www.novalynx.com)	39
Figura 4.4 – Os anemómetros em 2-D ignoram a componente vertical do vento. Este anemómetro 3-D mede a velocidade do vento em três dimensões baseada no tempo de deslocamento de sinais acústicos ultrasónicos. (Fonte: www.novalynx.com)	40
Figura 4.5 – Sensor de direcção de vento (Fonte: www.envcoglobal.com)	41

Figura 4.6 –Piranómetro com temopilha em pormenor	43
Figura 4.7 – Piranómetro Eppley Model PSP, instrumento de referência de primeira classe, definido pela WMO [15].....	43
Figura 4.8 – Piranómetro com um sistema de sombreamento para medição da radiação difusa. Este sistema necessita do ajuste à orbita do Sol regularmente (Fonte: www.volker- quaschnig.de)	43
Figura 4.9 – Piranómetro baseado em silício	44
Figura 4.10 – Piranómetro com fotodiodo decélula silício	44
Figura 4.11 – Pireliómetro capaz de medir radiação solar directa, seguindo continuamente o Sol	45
Figura 4.12 – Pireliómetro em pormenor (Fonte: www.powerfromthesun.net)	45
Figura 4.13 – Termopar do tipo K usado num forno eléctrico	48
Figura 4.14 – Termístores do tipo PTC.....	50
Figura 4.15 – Termístores do tipo NTC	50
Figura 4.16 – Operador a verificar a temperatura do sistema de ventilação	51
Figura 4.17 – Estação meteorológica Davis Vantage Pro 2	54
Figura 4.18 – Ligação da consola Davis Vantage Pro 2 a um computador pessoal [37]	55
Figura 4.19 – Ligação do Weather Envoy. a um computador pessoal [38].....	55
Figura 4.20 – Interface do programa WeatherLink.....	56
Figura 4.21 – Basic Weather Station BWS200 Series	57
Figura 4.22 – Interface do programa Visual Weather [39].....	58
Figura 4.23 – Rosa-dos-ventos desenhada pelo programa Visual Weather [39]	59
Figura 5.1 – Modelo Conceptual do sistema desenvolvido.....	62
Figura 5.2 – Integração de sistemas em detalhe	63
Figura 5.3 – Sistemas de Produção de Energia a partir de fontes Renováveis	64
Figura 5.4 – Gerador eólico de baixa potência instalado no Departamento de Engenharia Electrotécnica.....	64
Figura 5.5 – Potência gerada em função da velocidade do vento, segundo o fabricante (Fonte: Manual do equipamento)	65
Figura 5.6 – Painéis fotovoltaicos instalados no Departamento de Engenharia Electrotécnica ..	66
Figura 5.7 – Contadores de energia UPT210 instalados no DEE	67
Figura 5.8 – Estação Meteorológica	68
Figura 5.9 – Datalogger Em50	70
Figura 5.10 – Formato das mensagens numa comunicação série	73
Figura 5.11 – Anemómetro Davis Cup	74
Figura 5.12 – Piranómetro PYR (Fonte: www.decagon.com).....	76
Figura 5.13 – Resposta espectral do Piranómetro Apogee [26].....	76

Figura 5.14 – Sensor de temperatura ECT e escudo de radiação (Fonte: www.decagon.com) ...	77
Figura 5.15 – Escudo de radiação construído a partir de vários pratos de plástico.....	79
Figura 5.16 – Estação meteorológica instalada no Departamento de Engenharia Electrotécnica.	
Legenda: (1) Anemómetro; (2) Piranómetro; (3) Termómetro e escudo de radiação.....	79
Figura 5.17 – Sistema desenvolvido (CORE) e ligações associadas.	80
Figura 5.18 – Sistema desenvolvido (CORE) em pormenor	81
Figura 5.19 – Bloco responsável pela comunicação e aquisição de dados.....	83
Figura 5.20 – Rotina Connect responsável pela ligação entre o computador pessoal e o instrumento (Adaptado de: www.mathworks.com).....	84
Figura 5.21 – Rotina Write Read Data responsável pela escrita e leitura de dados	85
Figura 5.22 – Rotina Configuration responsável pela configuração do equipamento	86
Figura 5.23 – Rotina Read Memory Data responsável pelo carregamento de dados da memória do datalogger Em50.....	87
Figura 5.24 – Rotina Read Real Time Data responsável pela leitura de dados instantâneos dos sensores ligados ao datalogger Em50	88
Figura 5.25 – Bloco responsável pelo processamento de dados	88
Figura 5.26 – Bloco responsável pela correlação de dados.	92
Figura 5.27 – Dados referentes à velocidade do vento (a vermelho), e aplicação de vários filtros:	95
Figura 5.28 – Potência eléctrica produzida por um painel fotovoltaico.....	96
Figura 5.29 – Bloco responsável pela interface com o utilizador	97
Figura 5.30 – Interface principal da aplicação desenvolvida	97
Figura 5.31 – Interface do programa responsável pela escolha de dados para correlação	99
Figura 5.32 – Interface do programa para apresentação e tratamento de dados correlacionados	99
Figura 5.33 – Interface do programa para apresentação da rosa-dos-ventos.....	100
Figura 6.1 – Velocidade do vento (cima). Direcção do vento (baixo)	101
Figura 6.2 – Rosa-dos-ventos	102
Figura 6.3 – Velocidade do vento (cima).	103
Figura 6.4 – Velocidade do vento (cima). Potência eléctrica gerada (baixo).....	104
Figura 6.5 – Potência do vento (Pvento) e potência eléctrica gerada (Pelect) (cima).....	106
Figura 6.6 – Potência eléctrica gerada em função da velocidade do vento	106
Figura 6.7 – Radiação solar (cima). Temperatura ambiente (baixo).....	107
Figura 6.8 – Radiação solar (cima). Potência eléctrica gerada (baixo)	108
Figura 6.9 –Potência eléctrica gerada em função da radiação solar.....	109
Figura 6.10 –Irradiância (cima). Rendimento da conversão de energia solar (baixo)	110
Figura 6.11 – Temperatura ambiente (cima). Potência eléctrica gerada (baixo).	110

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Sistemas de unidades	11
Tabela 2.2 – Escala de <i>Beaufort</i>	11
Tabela 2.3 – Direcções Cardeais.....	12
Tabela 2.4 – Direcções Colaterais	12
Tabela 2.5 – Direcções Subcolaterais	12
Tabela 2.6 – Classificação dos solos segundo a sua rugosidade (Adaptado de [1])	15
Tabela 2.7 – Densidade do ar em função da Temperatura (Adaptado de [1]).	18
Tabela 3.1 – Condições STC [17].....	30
Tabela 4.1 – Diferentes escalas de temperatura.....	46
Tabela 4.2 – Tipos de Termopares.....	49
Tabela 5.1 – Especificações do gerador eólico (Fonte: Manual do equipamento)	65
Tabela 5.2 – Especificações dos painéis fotovoltaicos (em condições STC)	66
Tabela 5.3 – Dados de geração disponíveis dos sistemas de energias renováveis	68
Tabela 5.4 – Duração da memória do datalogger Em50	71
Tabela 5.5 – Especificações do datalogger Em50 [24]	72
Tabela 5.6 – Especificações do anemómetro <i>Davis Cup</i> [25]	75
Tabela 5.7 – Especificações do piranómetro <i>Apogee</i> [26].	77
Tabela 5.8 – Especificações do termómetro ECT.....	78
Tabela 5.9 – Material adicional para montagem da Estação Meteorológica	78
Tabela 5.10 – Informação sobre o Piranómetro.....	89
Tabela 5.11 – Informação sobre o anemómetro	90
Tabela 5.12 – Informação sobre o termómetro.....	90
Tabela 5.13 – Formato dos ficheiros MS Excel criados.....	91
Tabela 5.14 – Variáveis disponíveis para correlação.	93
Tabela 5.15 – Filtros e métodos de suavização de gráficos disponíveis.	94

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A Humanidade nem sempre foi dependente do uso de combustíveis fósseis como fonte de energia, como é na actualidade. Em termos de produção de energia, o final do século XVIII era dominado por técnicas de uso do vento, água (moinhos) e lenha para satisfazer todas as necessidades energéticas.

Devido aos melhoramentos no motor a vapor por *James Watt* em 1769, a adopção deste na indústria, e mais tarde com o aparecimento do motor de combustão interna, rapidamente alguns equipamentos mecânicos que fazem uso do vento e água são substituídos. O carvão torna-se assim a fonte de energia mais importante nesta época.

No início do século XX e com a popularização do tráfego motorizado, o petróleo torna-se uma fonte de energia indispensável. A lenha como matéria energética perde a sua importância na indústria e surgem as centrais hidroeléctricas. O gás natural ganha importância depois da Segunda Guerra Mundial, e a energia nuclear na década de 60. Actualmente os combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – representam mais de 85% da procura de energia primária Mundial [1].

O crescimento contínuo da população mundial, aliado à evolução tecnológica principalmente no século XX e XXI tem tido consequências directas na necessidade de produções de energia eléctrica cada vez maiores. A procura e consumo de energia são principalmente afectados pela demografia, e seu impacto no crescimento e desenvolvimento económico, pelo crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), pelos preços da energia, nomeadamente preços dos combustíveis fósseis, e pela evolução das várias tecnologias do sector de energia, tanto tecnologias existentes como inovadoras [2].

O uso de combustíveis fósseis como principais fontes de energia tem permitido à Humanidade a sobrevivência em áreas como a agricultura, indústria e transportes. Devido ao aumento exponencial do consumo energético mundial, diminuição das reservas de

combustíveis fósseis na natureza como o petróleo e gás natural e o aumento da poluição associada, surgiu a necessidade de encontrar fontes de energia alternativas [2].

A massificação e o desenvolvimento tecnológico de sistemas capazes de produzir energia eléctrica a partir de fontes de energia renovável têm-se tornado nas grandes revoluções do presente século. Existe cada vez mais a necessidade de uma produção, em grande escala, de energia não poluente a partir de recursos renováveis, reduzindo assim a dependência de combustíveis fósseis.

As fontes de energia limpas e sustentáveis presentes no nosso planeta são basicamente o vento, a água, a radiação solar, a biomassa e a energia geotérmica. Nesta Dissertação os sistemas de energias renováveis sob estudo utilizarão apenas fontes de energia como o vento e radiação solar para produção de energia eléctrica.

Os sistemas que tiravam partido do vento como fonte de energia no passado, essencialmente moinhos desenvolvidos para automatizar as tarefas de moagem de grãos e bombeamento de água, evoluíram actualmente para sistemas de produção de energia eléctrica capazes de produzir vários MW de potência.

Historicamente, o Sol é visto como a fonte energética mais importante. Actualmente existem vários sistemas que usando a energia solar, convertem a radiação solar proveniente, tanto em electricidade como calor: células solares para a produção de energia eléctrica (células fotovoltaicas), centrais de energia solar térmica, colectores solares para aquecimento de água e sistemas passivos de aquecimento solar.

A produção de energia eléctrica a partir de energias renováveis depende fortemente, para além da tecnologia aplicada, das condições meteorológicas existentes num determinado local. Sabendo as condições meteorológicas de um local, é possível otimizar qualquer sistema que tire partido de fontes de energia renováveis. O conhecimento sobre o comportamento das variáveis meteorológicas que condicionem qualquer sistema que use fontes renováveis para produzir energia eléctrica, torna-se num ponto crucial para a monitorização de produção energética.

Alguns sistemas de aquisição de dados – Estações Meteorológicas – têm sido desenvolvidos permitindo a medição das condições meteorológicas, nomeadamente velocidade e direcção do vento, precipitação, temperatura ambiente, pressão atmosférica, humidade relativa e radiação solar. À medida que os computadores e sistemas electrónicos se tornaram mais baratos, o número de sistemas capazes de adquirir dados sobre as condições meteorológicas foi aumentando e a sua localização tornou-se mais descentralizada. Com o aparecimento da internet e toda a partilha de informação, é possível hoje consultar dados nas

mais variadas cidades do Mundo, graças a muitas destas Estações Meteorológicas instaladas localmente.

Os dados adquiridos por estes sistemas, podem ter aplicação em serviços públicos de meteorologia, na agricultura, na aviação, na navegação, e previsão e atenuação do impacto de desastres naturais. Usados por aeroportos para melhorar a eficiência e assegurar a segurança na aviação e para previsão meteorológica, por serviços florestais para prever incêndios, estes sistemas constituem também, uma ferramenta de grande relevância para a monitorização local de sistemas de energias renováveis, como por exemplo um gerador eólico ou um sistema de células fotovoltaicas [3].

Em Portugal, como em todo o Mundo, existem instaladas localmente várias Estações Meteorológicas. A organização *World Meteorological Organization (WMO)* com actualmente 189 membros representa a organização das Nações Unidas responsável pela meteorologia (tempo e clima). Esta organização promove a cooperação entre estados para o estabelecimento de redes para observação meteorológica, climatológica, hidrológica e geofísica, tal como a partilha de informação destes dados. Dentro do programa *Public Weather Services Programme* da WMO surgiu o *World Weather Information Center* do qual faz parte o Instituto de Meteorologia de Portugal, onde é possível visualizar dados na internet disponibilizados por várias instituições meteorológicas mundiais [4].

O Instituto de Meteorologia (IM) português efectua a vigilância meteorológica, a monitorização sísmica, o acompanhamento do clima e das alterações climáticas com base em informação nacional, europeia e mundial que circula num circuito especializado de comunicações [5]. Relativamente à observação nacional de meteorologia, para além da informação mundial e imagens de satélite, existem várias Estações Meteorológicas automáticas (EMA) colocadas em todo o país. A rede de estações possui 93 EMA, as quais registam de 10 em 10 minutos as condições meteorológicas principais e elaboram de forma automática mensagens em forma de código que são enviadas para a sede do IM e difundidas internacionalmente [5].

O projecto *Personal Weather Stations (PWS)*, permite que qualquer pessoa que queira adquirir uma Estação Meteorológica e fornecer os seus dados, o possa fazer através do sítio na Internet criado por este projecto. Desta forma qualquer utilizador particular que se interesse por analisar o clima, para qualquer propósito, tem a possibilidade de fornecer os seus dados e visualizá-los na Internet. O projecto possui já dados de milhares de estações, e pode ser consultado em [6].

Várias universidades tomaram a iniciativa de instalar estas Estações Meteorológicas para tratamento de dados na própria instituição, como por exemplo a *University of Otago Campus*, na Nova Zelândia, onde utilizam os dados adquiridos para a avaliação da viabilidade das opções de geração de energia renovável como painéis solares e geradores eólicos, e para avaliar o desempenho térmico dos edifícios. Estes dados meteorológicos estão disponíveis para consulta na Internet [7].

1.2 Objectivos

O trabalho desenvolvido na presente Dissertação centra-se no desenvolvimento de um sistema capaz de adquirir e tratar dados meteorológicos no mesmo local onde estarão colocados um gerador eólico e painéis solares. A partir dos dados obtidos, e com a informação das potências desenvolvidas por estes sistemas de geração de energia renovável, será possível analisar e monitorizar a influência das condições meteorológicas no desempenho energético destes sistemas.

O objectivo central da Dissertação passa pelo desenvolvimento de um programa de *software* responsável pela gestão, tratamento e correlação de dados meteorológicos e dados de produção energética. Os dados meteorológicos serão adquiridos através de uma estação meteorológica equipada com vários sensores colocada no mesmo local que os sistemas de energia renovável. Será feita uma leitura periódica das pertinentes grandezas atmosféricas, nomeadamente velocidade e direcção do vento, temperatura e radiação solar. Os dados de geração de energia serão disponibilizados por um outro sistema concebido para o efeito e já implementado [8].

No sistema implementado é importante definir vários objectivos parciais:

- Comunicação e aquisição de dados através da estação meteorológica,
- Tratamento e Apresentação de dados,
- Análise e Correlação de dados meteorológicos com dados de geração de energia dos sistemas de produção de energia renovável.

1.3 Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 faz-se uma introdução ao tema da Dissertação, enquadrando-o historicamente e apresentando as principais motivações por detrás do trabalho realizado.

No capítulo 2 explica-se a origem e analisam-se as principais características do recurso eólico, tal como a sua grande variabilidade e influência na potência eléctrica produzida através de turbinas eólicas.

No capítulo 3 analisam-se as principais características do recurso solar, explica-se resumidamente o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas e a influência que a radiação solar e a temperatura têm na produção de energia eléctrica.

No capítulo 4 apresentam-se vários sensores capazes de medir variáveis meteorológicas explicando resumidamente o seu modo de funcionamento e fenómenos físicos associados, e os sistemas de aquisição de dados que interligam estes sensores. É feito um estado da arte de vários destes equipamentos, colmatando na referência a sistemas que se aproximam do trabalho realizado nesta Dissertação.

No capítulo 5 é descrito todo o trabalho realizado para a implementação do sistema proposto que interliga dados meteorológicos e dados energéticos com o utilizador através da aplicação desenvolvida, desde a fase de concepção do sistema até ao produto final.

O capítulo 6 inclui um estudo realizado a partir da aquisição de dados meteorológicos e energéticos durante sete dias consecutivos. Neste capítulo são apresentados vários gráficos elaborados através da aplicação desenvolvida onde existe o cruzamento, correlação e análise comparativa entre dados, justificando a grande influência das condições meteorológicas na produção de energia eléctrica através de sistemas de energias renováveis.

No capítulo 7 é feita uma conclusão sobre todo o trabalho desenvolvido e potencialidades do sistema, referindo os seus pontos fortes. Neste capítulo são também sugeridos vários trabalhos futuros com base no trabalho realizado.

Capítulo 2

Energia Eólica

Neste capítulo serão abordadas as suas principais características do recurso eólico. Posteriormente, explica-se de que forma este recurso natural poderá ser usado, e que influência as suas características poderão ter na produção de energia eléctrica.

2.1 Formação e dinâmica do vento

A energia produzida por sistemas de energia eólica provém do aproveitamento de um recurso natural, ou seja, do aproveitamento dos ventos existentes no planeta. O vento pode ser definido como o movimento de parcelas de ar nas atmosferas terrestres. A energia eólica representa uma forma indirecta de energia solar basicamente porque o vento é originado por diferenças de temperatura na Terra causadas pela radiação solar.

As flutuações sazonais e regionais da radiação solar aliadas à forma esférica da Terra e à sua rotação, causam diferenças espaciais na pressão atmosférica resultando no movimento de massas de ar. O facto da radiação solar nas zonas equatoriais ser maior do que nas zonas polares é a razão pela qual se formam correntes compensadoras de ar [1]. Os ventos actuam assim, como um mecanismo de equilíbrio térmico, de forma a compensar o desequilíbrio latitudinal de energia da Terra.

Se a Terra não possuísse um movimento rotacional, e não existissem forças de atrito na superfície terrestre, o movimento do ar seria simplesmente das zonas de alta para baixa pressão. No entanto, devido à existência destes dois factores, o movimento do vento é controlado pela combinação de forças. De forma a melhor compreender a formação e a dinâmica dos ventos poderemos considerar as seguintes forças básicas:

- Força de gradiente de pressão;
- Força de Coriolis;
- Força de atrito.

A força de gradiente de pressão é a força que gera o vento e é a que controla a maior parte dos movimentos de massas de ar na atmosfera. Esta força refere-se ao movimento

horizontal (latitudinal) do ar, das zonas de alta para baixa pressão. Depois de iniciado o movimento do ar, entram outras forças em acção, mas apenas para modificar o movimento e não para produzi-lo – força de Coriolis e força de atrito.

A força de Coriolis produz um desvio na circulação do ar devido à rotação da Terra. Devido a este efeito de Coriolis, o movimento do ar de zonas de alta para baixa pressão no Hemisfério Norte, sofre uma deflexão para a direita, enquanto no Hemisfério Sul, o ar que se move das altas para baixas pressões é deflectido para a esquerda. A força de Coriolis tem valor máximo nos pólos e é igual a zero no equador. A todas as latitudes, excepto a do equador, a força de Coriolis depende directamente da velocidade do vento [9].

A força de atrito é referente ao atrito entre o ar em movimento e a superfície acidentada da Terra, causando um abrandamento e mudança na direcção do vento, e depende do nível de irregularidade do solo por onde o ar se desloca e da sua velocidade. Em geral esta força é importante apenas à superfície, em toda a camada limite atmosférica¹, em altitudes entre os 30 e 3 km, dependendo da estabilidade atmosférica [9].

A dinâmica dos ventos é influenciada pelas forças mencionadas anteriormente, mas dependendo da altitude em que nos focamos, algumas forças terão mais influência que outras no movimento do vento.

Acima da camada limite atmosférica, a força de atrito é pequena o suficiente para ser desprezada. Quando existe um equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis, o vento pode ser chamado de vento geostrófico. Estes ventos movem-se em linha recta, paralelamente às linhas isóbaras², com velocidades proporcionais à força de gradiente de pressão [10]. Os ventos que se movem a uma velocidade constante paralelamente às linhas isóbaras são chamados de ventos gradientes. É semelhante ao vento geostrófico, só que aplicado ao movimento circular uniforme, resultando a inclusão da força centrífuga (devido à curvatura das linhas isóbaras).

Abaixo da camada limite atmosférica, a intensidade e direcção do vento é influenciada pela força de atrito devido às irregularidades e morfologia da superfície terrestre.

As seguintes figuras resumem a influência de cada força nos ventos na superfície e em altitude.

¹ A **Camada Limite Atmosférica** (CLA) ou **Camada Limite Planetária** (CLP) como também é conhecida, situa-se na baixa troposfera e sofre directamente a influência da superfície.

² As isóbaras são referentes a linhas de um mapa que ligam pontos de igual pressão atmosférica, medido em bares.

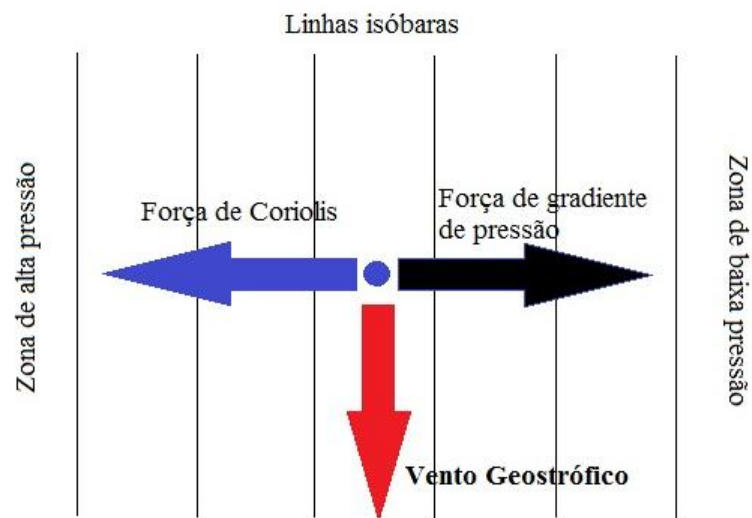


Figura 2.1- Em altitude, a força de atrito é nula - o vento geostrófico sopra da zona de alta para baixa pressão paralelamente às isóbaras.

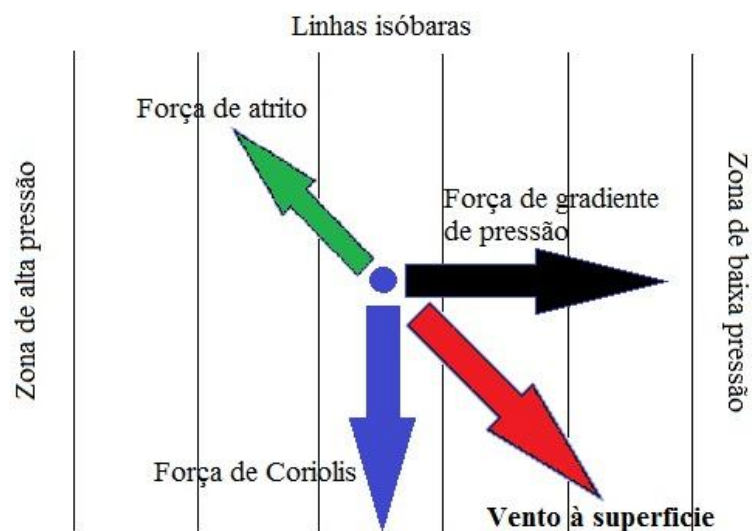


Figura 2.2 - Na superfície actua a força de atrito - o vento atravessa as isóbaras com um ângulo tanto maior quanto for a força de atrito.

Existem outros tipos de vento, para além dos já citados, que se distinguem pelas forças que neles actuam. Os mais importantes são:

- O vento ciclostrófico, associado a ciclones tropicais e ventos de grandes velocidades;
- O vento barostrófico, onde apenas se manifesta a força de gradiente de pressão, e está relacionado com o movimento do vento devido às oscilação de temperatura terrestre e marítima. Os melhores exemplos de ventos deste tipo são os ventos brisa terrestre e brisa marítima.

2.2 Variabilidade do vento

Na secção anterior vimos que o vento resulta basicamente da interacção de várias forças presentes na atmosfera terrestre. Acima da camada limite atmosférica existem basicamente ventos geostróficos e gradientes que se movem paralelamente às linhas isóbaras. A camada de interesse para instalação das turbinas eólicas é à superfície, na camada limite atmosférica. Nesta camada, a velocidade e direcção dos ventos são modificadas devido às forças de atrito e obstáculos presentes. Isto origina ventos turbulentos, que causam grandes variações na velocidade do vento. Adicionalmente, a presença de mares e grandes lagos provoca a circulação de grandes massas de ar (ventos barostróficos), semelhante aos ventos geostróficos.

O vento que interage com as turbinas eólicas num determinado local, resulta de uma combinação dos ventos à superfície com os ventos em altitude. Para um aproveitamento da energia presente nos ventos é necessário perceber as suas características principais. O vento é caracterizado pela sua velocidade e a sua direcção (e a grande variabilidade destas grandezas), que são afectados por vários factores:

- Características climáticas;
- Altura acima do nível do solo;
- Rugosidade do solo;
- Localização geográfica;
- Obstáculos presentes.

Como veremos na secção 2.5, tanto a potência mecânica disponível nos ventos como a potência mecânica que a turbina conseguirá aproveitar é fortemente dependente da velocidade do vento.

2.3 Velocidade e direcção do vento

A velocidade dos ventos pode ser expressa em várias unidades de medida, relacionando o espaço e tempo, sendo que a mais utilizada neste documento será a do Sistema Internacional de Unidades (SI), ou seja, metro por segundo (m/s). Na próxima tabela são representadas várias unidades de medida usadas para expressar a velocidade do vento (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Sistemas de unidades

Sistema	Unidades	Equivalência
Sistema Internacional de Unidades (SI)	Metro por segundo (m/s)	1 m/s = 3,6 km/h
Sistema imperial de medidas	Milhas por hora (mph)	1 mph = 0,44704 m/s
Navegação marítima/aérea	Nó (nó)	1 nó = 0,51444 m/s

De forma a melhor perceber a força da intensidade dos ventos, surgiu a escala de *Beaufort*, que embora seja pouco útil em termos técnicos, permite uma estimativa aproximada da velocidade do vento, classificando os efeitos resultantes tanto no mar como em terra. A seguinte tabela mostra a classificação do vento pela escala de *Beaufort*, com as correspondentes velocidades do vento (m/s), e algumas influências em terra (Tabela 2.2) [1].

Tabela 2.2 – Escala de *Beaufort*

Escala Beaufort	Descrição	Velocidade do Vento (m/s)	Influência em terra
0	Calmo	< 0,3	O fumo sobe na vertical
1		0,3 – 1,5	O fumo move-se indicando a direcção do vento
2	Brisa ligeira	1,6 – 3,3	O vento é sentido no rosto. As folhas das árvores agitam-se.
3		3,4 – 5,4	Os ramos pequenos das árvores agitam-se. Bandeiras leves soltam-se ao vento.
4	Brisa moderada	5,5 – 7,9	Os ramos maiores agitam-se. Poeira e pequenos papéis são levantados.
5	Brisa fresca	8,0 – 10,7	As árvores pequenas agitam-se. Superfície dos lagos ondula.
6	Brisa forte	10,8 – 13,8	Árvores começam a dobrar-se. Dificuldade em manter um guarda chuva aberto.
7	Ventania moderada	13,9 – 17,1	Árvores grandes agitam-se. Dificuldade em andar contra o vento
8	Ventania fresca	17,2 – 20,7	Partem-se os ramos das árvores. Circulação de pessoas difícil.
9	Ventania forte	20,8 – 24,4	Danos em árvores. Impossível andar contra o vento.
10	Tempestade	24,5 – 28,4	Árvores arrancadas. Danos na estrutura de construções
11	Tempestade violenta	28,4 – 32,6	Estragos abundantes em telhados e árvores
12	Furacão	>= 32,7	Grandes estragos

A direcção do vento corresponde à direcção de onde o vento sopra. Desta forma, é possível classificar um vento como “vento Norte”, isto significa que ele se desloca de Norte

para Sul. Segundo a convenção da *WMO* a direcção do vento é classificada em direcções cardeais (Norte, Sul, Este, Oeste), colaterais e subcolaterais, ou em graus azimutais (de 0° a 360°) (Tabela 2.3, 2.4 e 2.5). Com a ajuda de uma rosa-dos-ventos podemos também ter uma imagem representativa da direcção que os ventos podem tomar (Figura 2.3).

Tabela 2.3 – Direcções Cardeais

Direcções Cardeais	Graus azimutais
Norte (N)	0°
Este (E)	90°
Sul (S)	180°
Oeste (O)	270°

Tabela 2.4 – Direcções Colaterais

Direcções Colaterais	Graus azimutais
Nordeste (NE)	45°
Sudeste (SE)	135°
Sudoeste (SO)	225°
Noroeste (NO)	315°

Tabela 2.5 – Direcções Subcolaterais

Direcções Subcolaterais	Graus azimutais
Nor-Nordeste (NNE)	22.5°
Lés-Nordeste (ENE)	67.5°
Lés-Sueste (ESE)	112.5°
Su-Sueste (SSE)	157.5°
Su-Sudoeste (SSO)	202.5°
Oés-Sudoeste (OSO)	247.5°
Oés-Noroeste (ONO)	292.5°
Nor-Noroeste (NNO)	337.5°

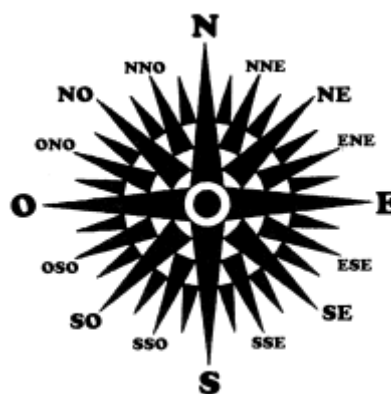


Figura 2.3- Rosa-dos-ventos
(Fonte: www.cne-escutismo.pt)

No próximo gráfico (Figura 2.4) é possível observar uma variação média da velocidade do vento e sua direcção, calculadas de 10 em 10 minutos, ao longo de um dia. Estes dados foram lidos por uma estação meteorológica privada situada no Cais do Sodré, Lisboa [11].

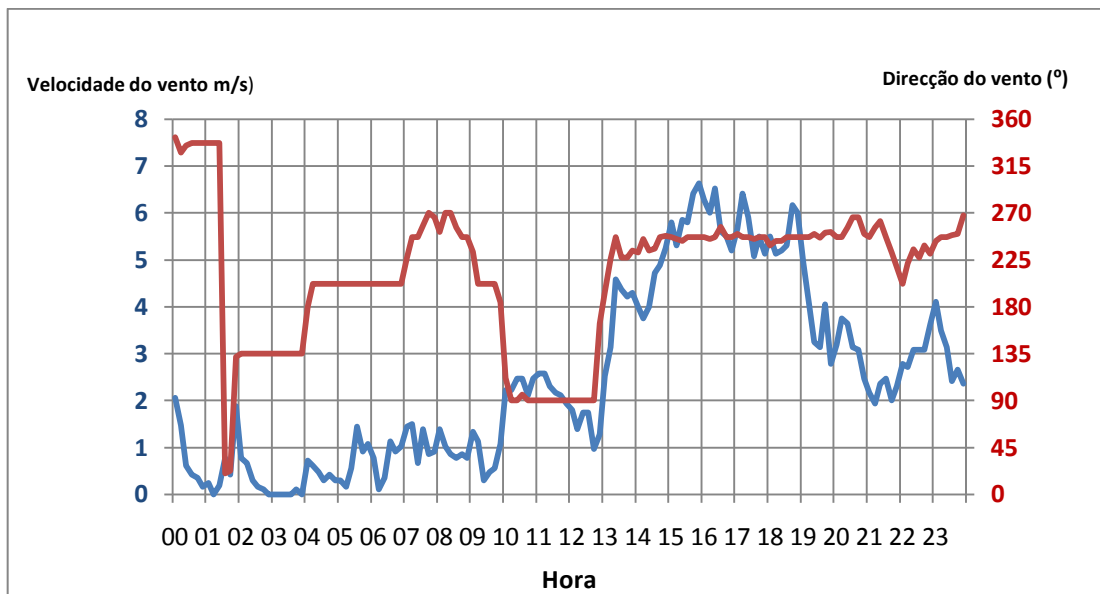


Figura 2.4- Velocidade direcções médias do vento (12-Abril 2010)

Através da análise do gráfico em questão (Figura 2.4) é possível comprovar a grande imprevisibilidade do vento, tal como a sua natureza praticamente aleatória.

Em relação ao mesmo local podemos obter uma rosa-dos-ventos contendo informação sobre a velocidade e intensidade dos ventos (Figura 2.5). É possível observar nesta rosa-dos-ventos vários ramos representando o vento que sopra dessa direcção, ou seja o ramo virado para Este representa os ventos que sopram de Este (90°). Cada um desses ramos está dividido em segmentos de espessuras e cores diferentes, que representam os intervalos das velocidades do vento vindos da direcção do ramo em questão. O comprimento de cada segmento dentro de um ramo é proporcional à frequência dos ventos dentro do correspondente intervalo de velocidades vindos dessa direcção.

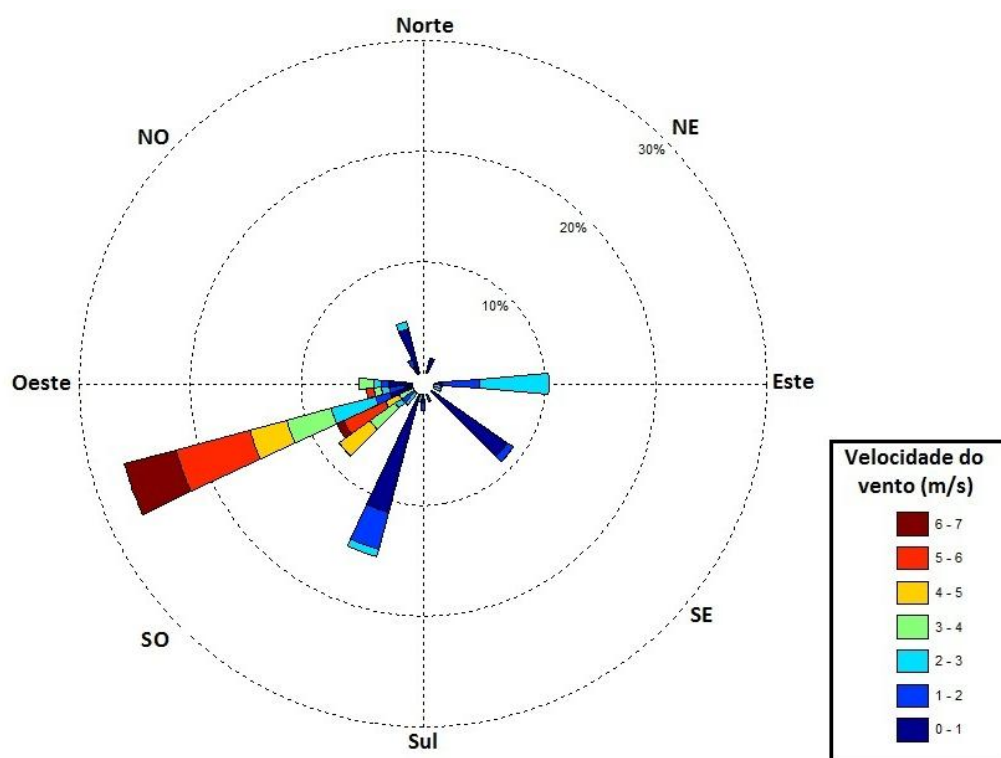


Figura 2.5- Rosa-dos-ventos com dados da direcção e velocidade do vento (12-Abril 2010)

A partir do gráfico da Figura 2.4 e da Rosa-dos-ventos da Figura 2.5 podemos observar a grande variabilidade destas duas características do vento. É importante referir que o vento pode variar muito numa hora como num dia ou num mês.

2.4 Influência da superfície terrestre no vento

A velocidade e a direcção do vento são particularmente afectadas pela rugosidade da superfície terrestre e variam consoante a altura ao solo. Obstáculos, plantas ou montes na vizinhança de uma turbina eólica podem abrandar o vento significativamente. Mesmo sem obstáculos à superfície, existem forças de atrito que retardam a velocidade do vento. A velocidade do vento aumenta com a altura ao solo porque a rugosidade do solo abrandar o seu andamento. As medidas da velocidade do vento são normalmente obtidas a uma altura de 10 metros do solo [1].

Esta influência da superfície terrestre na forma como o vento se comporta, torna crucial o conhecimento de dados do vento no local que se pretenda estudar, e não de locais próximos. No aproveitamento do recurso eólico através de um gerador eólico, é importante conhecer o

comportamento do vento no local onde este será instalado. É por isso essencial que o sistema instalado para aquisição de dados sobre o vento se encontre no mesmo local e à mesma altura que o gerador eólico que se pretenda monitorizar.

A camada superficial na camada limite atmosférica representa a camada de interesse para a instalação de turbinas eólicas, até uma altura aproximada de 100 metros [12]. Pode ser feita uma estimativa do potencial do vento em função da altura ao solo, recorrendo à seguinte expressão matemática (que advém da aplicação da lei logarítmica de Prandtl [13]):

$$\frac{V(z)}{V(z_{ref})} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad (2.1)$$

Onde $V(z)$ corresponde à velocidade que se pretende calcular à altura z , e $V(z_{ref})$ à velocidade conhecida à altura de referência z_{ref} (normalmente 10 metros [13]). A variável z_0 é conhecida como comprimento característico da rugosidade do solo [12]. Este valor é experimentalmente determinado para vários tipos de solo, e quanto maior o seu valor, maior é o seu efeito na velocidade do vento. A Tabela 2.6 apresenta vários valores de comprimento característico de rugosidade z_0 típicos, para vários tipos de solo. O comprimento característico de rugosidade varia também com a direcção do vento e com a estação do ano, sendo importante para a caracterização de um local [12].

Tabela 2.6 – Classificação dos solos segundo a sua rugosidade (Adaptado de [1])

Classificação do solo		Comprimento característico de rugosidade z_0 (m)	Descrição
1	Mar	0.0002	Mar aberto
2	Calmo	0.005	Superfície plana lamacenta
3	Aberto	0.03	Terreno aberto e plano, pasto
4	Aberto/Rugoso	0.1	Terreno agrícola com baixa densidade populacional
5	Rugoso	0.25	Terreno agrícola com alta densidade populacional
6	Muito Rugoso	0.5	Parque com árvores e arbustos
7	Cerrado	1	Obstáculos regulares (florestas, vilas, subúrbios)
8	Centro da cidade	2	Centros de grandes cidades com edifícios altos e baixos

Na instalação de turbinas eólicas é importante analisar bem a que alturas deverão ser colocadas. A velocidade do vento disponível no topo de uma turbina eólica instalada numa altura elevada é bastante superior à velocidade do vento à altura típica de 10 metros (Figura 2.6).

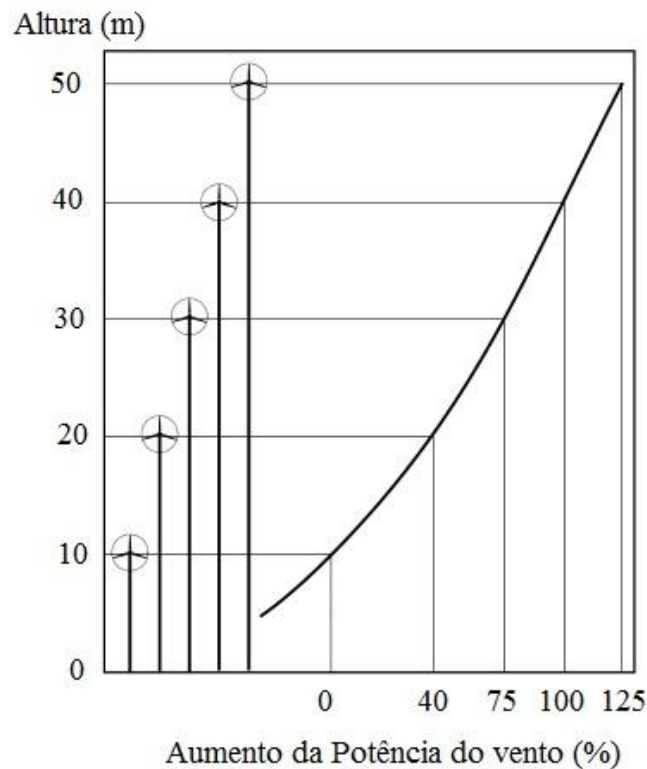


Figura 2.6- Aumento da velocidade do vento com a altura, e consequentemente aumento da potência do vento (Adaptado de: *United States Department of Energy*)

2.5 Potência eólica disponível e utilizável

A energia eólica é simplesmente a energia presente nos ventos. Os geradores eólicos permitem gerar energia eléctrica a partir do vento, mas para o seu dimensionamento é necessário quantificar a energia do vento disponível num determinado local para determinadas condições. A seguinte figura ilustra de que modo um gerador eólico aproveita a potência do vento (P_{vento}) para produzir uma potência útil mecânica ($P_{útil}$) convertendo-a em potência eléctrica (P_{elect}).

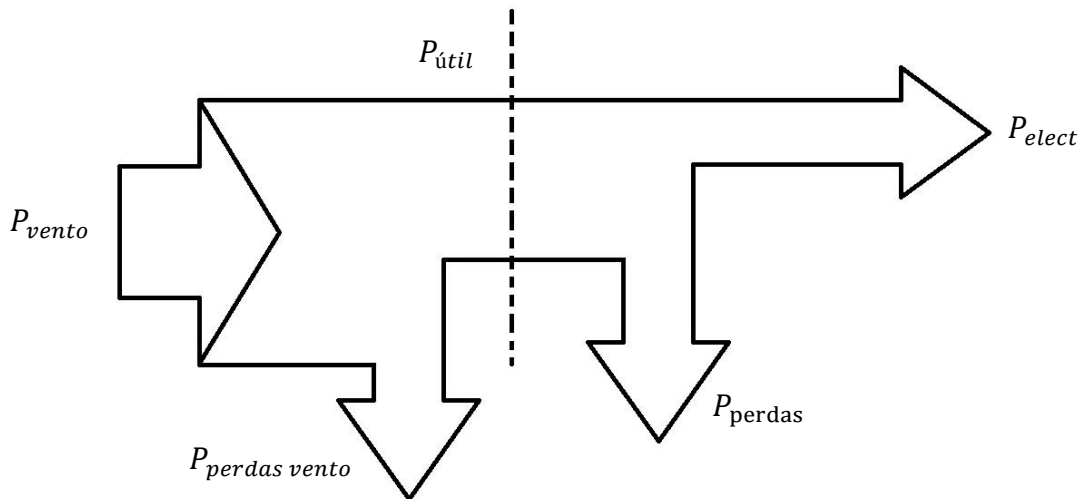


Figura 2.7- Diagrama de potências envolvidas numa turbina eólica

2.5.1 Potência disponível do vento

Através das turbinas eólicas, a energia cinética contida no vento é convertida em energia mecânica pelo movimento de rotação das pás do rotor, que por sua vez é convertida em energia eléctrica pelo gerador. Se considerarmos um determinado volume de ar de massa m , a movimentar-se com uma velocidade v , a sua energia cinética será:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.2)$$

No entanto, o que interessa é a relação energia-tempo, ou seja, a potência disponível teoricamente pelo movimento de uma massa de ar através de uma área de captação (área percorrida pelas pás das turbinas eólicas). A potência de uma massa de ar em movimento é calculada através da derivada da energia em ordem ao tempo. Considerando uma velocidade do vento constante v , temos:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 \quad (2.3)$$

Como a densidade ρ e o volume V determinam a massa, temos:

$$m = \rho \cdot V \quad (2.4)$$

A derivada em ordem ao tempo da massa resulta num fluxo de massa de ar:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.5)$$

A grandeza x representa deslocamento. Da equação 1.3 vem assim a potência mecânica disponível no vento, onde uma massa de ar com densidade ρ atravessa uma área A com uma determinada velocidade v :

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.6)$$

Se analisarmos a equação 1.6 facilmente verificamos que a potência mecânica disponível no vento é fortemente influenciada pela velocidade do mesmo, ou seja, se a velocidade do vento v duplicar, a potência é aumentada em oito vezes. No entanto, se a área das pás das turbinas A duplicar, a potência será aumentada apenas duas vezes. A densidade do ar ρ varia com a temperatura (Tabela 2.7) e com a pressão atmosférica.

Tabela 2.7 – Densidade do ar em função da Temperatura (Adaptado de [1]).

Temperatura (°C)	-20	-10	0	10	15	20	30	40
Densidade do ar ρ (kg/m ³)	1,377	1,324	1,275	1,230	1,225	1,188	1,149	1,112

2.5.2 Potência útil mecânica

Quando a potência do vento é usada para gerar energia eléctrica através das turbinas eólicas, é necessário que estes sistemas aproveitem a maior parte da potência mecânica do vento. Na secção anterior foi visto que o vento possui uma determinada potência mecânica disponível para ser aproveitada (equação 1.6). No entanto esta potência que poderá ser convertida por turbinas eólicas, não é totalmente convertida em potência útil mecânica no

veio da turbina. O movimento do vento através de uma turbina eólica pode ser analisado como mostrado na Figura 2.8. Existem duas velocidades do vento que são importantes analisar, a velocidade do vento antes (v_1) e a velocidade depois (v_2) de atravessar a turbina. Neste processo existe a perda de energia devido à rotação das pás da turbina que geram potência mecânica.

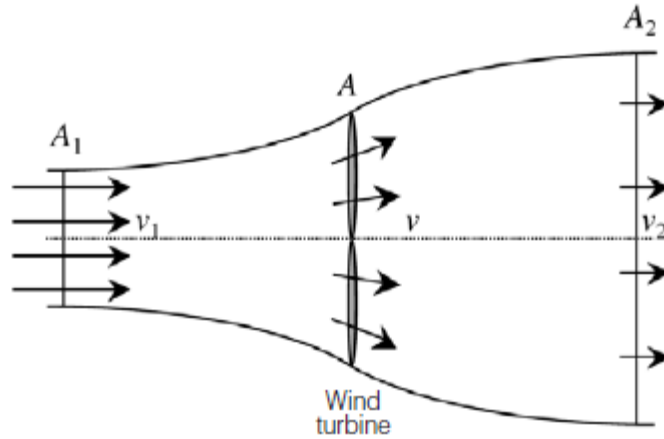


Figura 2.8- Variabilidade ideal da velocidade do vento numa turbina eólica [1]

Considerando que o fluxo de massa de ar antes e depois de atravessar a turbina se mantém constante tem-se:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \text{constante} \quad (2.7)$$

A velocidade do vento que passa nas pás da turbina eólica pode ser calculada através da média da velocidade do vento antes v_1 e depois v_2 de passar pelas pás:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.8)$$

Deste modo o fluxo de massa de ar que passa através das pás vem:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.9)$$

A potência extraída pelas pás das turbinas $P_{\text{útil}}$ é a diferença entre a potência do vento que entra e a potência do vento que sai. A partir das equações 1.3 e 1.9, a potência mecânica útil através da área A vem:

$$P_{\text{útil}} = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 + v_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.10)$$

2.5.3 Coeficiente de potência

O coeficiente de potência representa um coeficiente de rendimento, e é traduzido pela relação entre a potência mecânica útil usada pela turbina (equação 1.10) e a potência do vento (equação 1.6):

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{vento}}} \quad (2.11)$$

O físico alemão *Albert Betz* calculou o valor máximo teórico de coeficiente de potência C_p , que é conhecido como “Limite de Betz” ou “coeficiente de potência de Betz”. Este físico concluiu que para atingir esse valor máximo, a relação ideal entre velocidades de vento antes (v_1) e depois (v_2) da turbina seria tal que $v_2 = \frac{1}{3} v_1$. O limite de *Betz* vem assim:

$$C_{p,Betz} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (2.12)$$

Se uma turbina eólica reduzir a velocidade do vento inicial v_1 para um terço, isto é, o vento que sai da turbina vem $v_2 = \frac{1}{3} v_1$, o valor teórico máximo da potência poderá ser calculado ($C_{p,Betz}$ equação 1.12), e representa aproximadamente 60 por cento da potência disponível no vento [1]. A potência máxima idealizada extraída do vento se considerarmos $v_2 = \frac{1}{3} v_1$ será:

$$P_{id} = P_{disp} \cdot C_{p,Betz} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot 0,593 \quad (2.13)$$

Na prática os geradores eólicos não atingem este valor teórico ótimo de $C_{p,Betz}$. O valor máximo alcançado pelo coeficiente de potência varia entre 0,4 e 0,5 para turbinas modernas de alta velocidade de duas pás, e entre 0,2 e 0,3 para turbinas de baixa velocidade com mais pás [14].

Capítulo 3

Energia Solar

Neste capítulo explicam-se as principais características do recurso solar, e de que forma a energia recebida pela superfície terrestre poderá ser aproveitada para produzir energia eléctrica através de células fotovoltaicas. Posteriormente, explica-se a influência das condições meteorológicas na produção de energia.

3.1 Recurso Solar

A energia solar é a energia que sustenta vida na Terra para todas as plantas, animais e pessoas, e representa a fonte natural de energia renovável mais importante, sendo responsável por todos os fenómenos ambientais na superfície do planeta.

Esta energia solar é transmitida para o nosso planeta através de ondas electromagnéticas, que podem ser representadas também por partículas (fótons). A Terra funciona como um enorme colector de energia solar recebendo esta energia que é usada de variadas formas, tal como a luz do dia para a fotossíntese das plantas, aquecimento de massas de ar produzindo ventos e evaporação de oceanos resultando em chuvas que por sua vez formam rios e permitem o aproveitamento de energia hídrica.

Existem maneiras de aproveitar esta energia solar directamente, para aquecimento, por exemplo através de painéis solares térmicos ou para geração de electricidade através de células fotovoltaicas (PV³); e maneira indirectas, aproveitando a energia dos ventos, biomassa e hídrica. A energia solar que chega à superfície terrestre numa hora ($4,3 * 10^{20} J$) é superior a toda a energia consumida no planeta durante um ano ($4,1 * 10^{20} J$) [15].

Nesta secção será feito uma descrição da radiação solar proveniente do Sol na superfície terrestre e aproveitamento desta característica para produção de energia eléctrica, nomeadamente através de células fotovoltaicas.

³ Do inglês “Photovoltaics”.

3.1.1 Radiação Solar

O Sol é constituído por cerca de 80% de hidrogénio, 20% de hélio e apenas 0,1% de outros elementos. Através de processos nucleares de fusão entre estes elementos é libertada uma grande quantidade de energia [1].

Esta energia solar é emitida através de uma radiação electromagnética. A radiação electromagnética propaga-se na forma de uma onda, através do espaço com componentes eléctricas e magnéticas e é caracterizada pelo seu comprimento de onda e frequência. A radiação electromagnética pode ser classificada pelo seu comprimento de onda ou frequência em vários tipos de radiação (Figura 3.1).

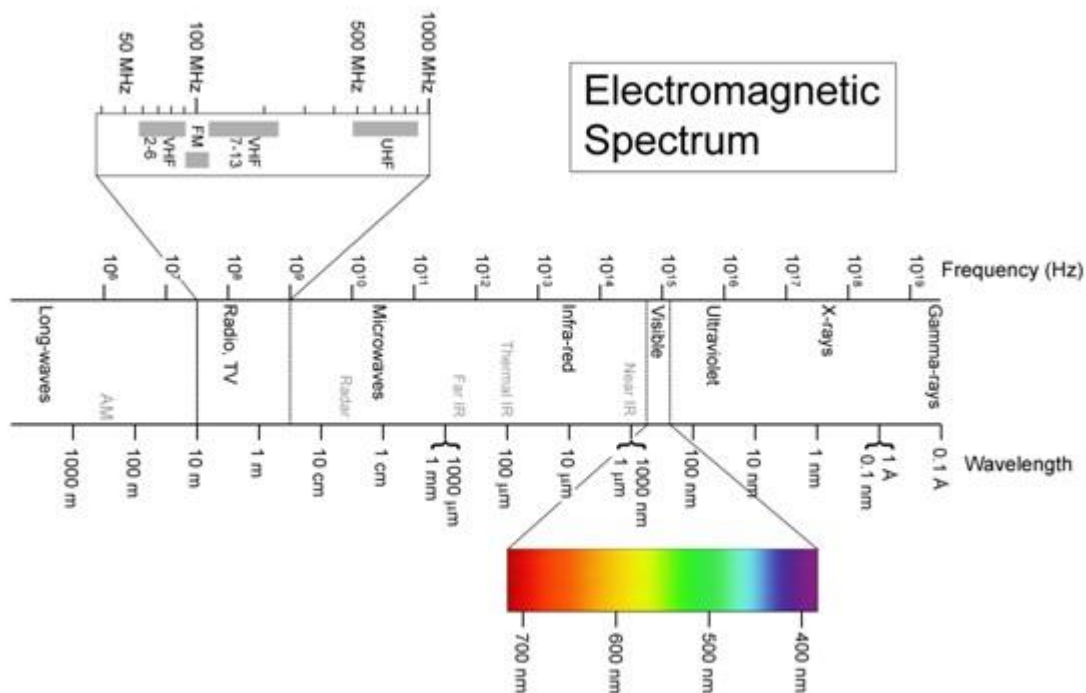


Figura 3.1 - Espectro Electromagnético (Fonte: Coastal Carolina University)

O Sol emite todas as formas de radiação electromagnética, mas em diferentes quantidades. Cerca de 95% da radiação solar é emitida em comprimentos de onda entre 100 e 2500 nanómetros, com muita desta energia concentrada próximo da zona de luz visível (Figura 3.2). A pequena zona de luz visível, entre aproximadamente 400 e 700 nanómetros, representa cerca de 43% da energia total emitida, enquanto a zona de infra-vermelhos 49% e a zona de

radiação ultra-violeta cerca de 7%. A radiação emitida em raios X, raios gama ou ondas de rádio representa apenas 1% da radiação solar.

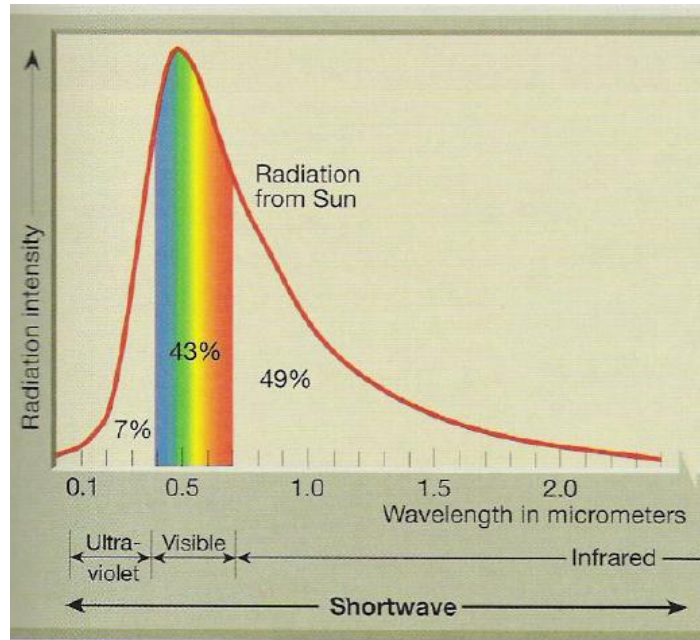


Figura 3.2 - Intensidade da radiação solar [10]

A energia proveniente do Sol não chega toda à superfície terrestre. Enquanto no espaço a radiação solar é praticamente constante, na Terra esta varia com o dia do ano, hora do dia, com a latitude e com o estado da atmosfera. A radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ser convertida em diferentes tipos de energia como calor ou electricidade usando diferentes tecnologias. Os sistemas térmicos tiram partido da radiação solar para, por exemplo, aquecer água, cozinhar, aquecimento térmico e secagem [10]. Por sua vez, as células fotovoltaicas são usadas para gerar electricidade para aplicações ligadas à rede eléctrica ou para sistemas autónomos. As células fotovoltaicas respondem de maneira diferente para diferentes comprimentos de onda, sendo que, uma célula baseada em silício cristalino pode usar todo o espectro visível, mais alguma parte do espectro de infravermelhos. No entanto a energia da parte do espectro de infravermelhos, tal como para radiações com comprimentos maiores é demasiado pequena para produzir uma corrente eléctrica. A luz com muita ou muito pouca energia não é utilizável por uma célula fotovoltaica para produzir electricidade, em vez disso é transformada em calor. A razão principal pela qual as células fotovoltaicas não possuem rendimentos de 100% é devido ao facto de estas não responderem a todo o espectro da radiação solar, não conseguindo absorver toda a energia proveniente do Sol.

As ondas electromagnéticas podem ser reflectidas ou dispersas, sendo que a energia é redireccionada ou redistribuída. À medida que a luz do sol passa através da atmosfera, alguma é absorvida, dispersa⁴, e reflectida pelas moléculas de ar, vapor de água, nuvens, poeira, e poluentes. A radiação solar global pode ser definida como a soma das duas seguintes componentes:

- A radiação solar directa - radiação solar que chega à superfície sem ser modificada pela atmosfera;
- e a radiação solar difusa - a parte da radiação solar dispersa pela atmosfera que chega à superfície e a energia reflectida na superfície pelo meio ambiente (Algumas bibliografias fazem a distinção entre radiação difusa e radiação reflectida).

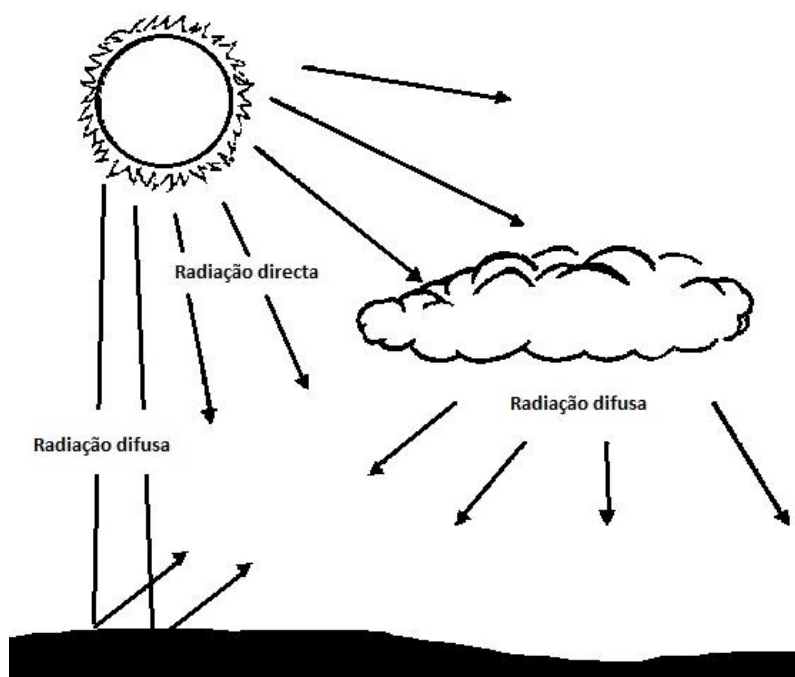


Figura 3.3 – Componentes da radiação solar global

As medidas da energia total solar na superfície são normalmente expressas pela radiação solar total medidas num plano horizontal ou num plano inclinado. Normalmente o plano

⁴ Dispersão de ondas - Se o meio oferecer mais resistência à passagem de certos comprimentos de onda do que outros, as velocidades das ondas no meio serão diferentes e consequentemente a forma da onda inicial mudará com o decorrer da sua passagem, havendo uma dispersão da onda electromagnética.

inclinado que maximiza a radiação solar absorvida tem uma inclinação aproximadamente igual à latitude do local [16].

A radiação solar ou irradiância é normalmente quantificada como densidade de fluxo de energia, que representa a potência instantânea radiante incidente numa superfície, por unidade de área (W/m^2). A Figura 3.4 mostra uma estimativa da irradiância média mensal obtida em Lisboa sobre um plano inclinado igual à latitude (latitude= $38,7^\circ$) durante um ano. Através do gráfico é possível observar um aumento progressivo da irradiância de Janeiro até Julho, seguindo-se de uma diminuição até Dezembro. Os meses de maior radiação solar correspondem aos meses de Verão, nomeadamente Junho, Julho e Agosto.

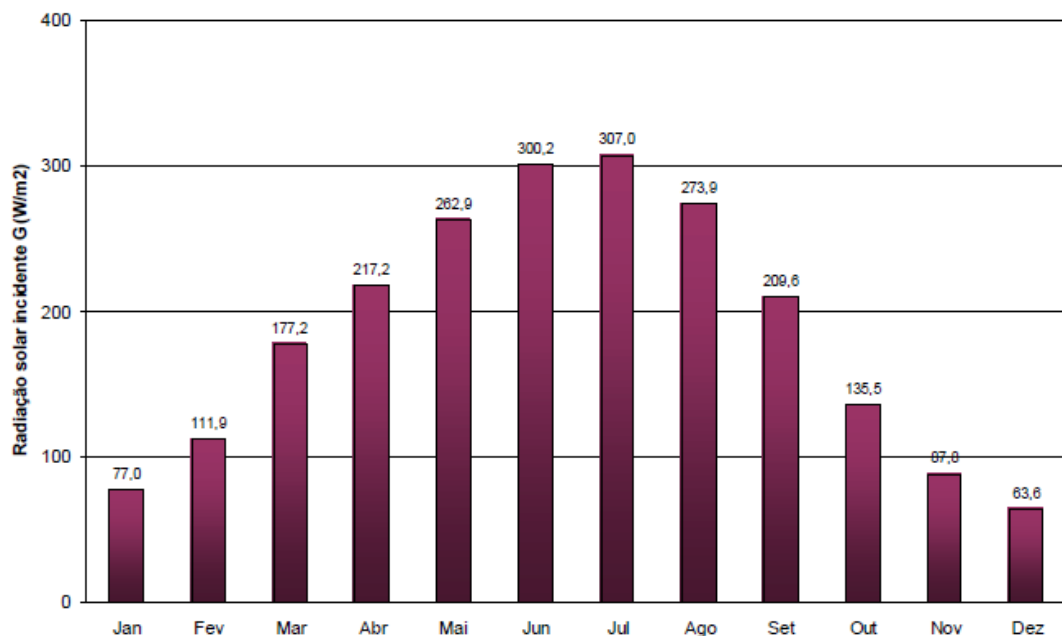


Figura 3.4 – Irradiância média mensal num plano inclinado ($38,7^\circ$) em Lisboa [16]

Uma outra definição da quantidade de energia corresponde ao pico de horas de sol (PSH⁵) e representa a média de radiação solar diária. Representado normalmente por kWh/m^2 , este termo refere-se à radiação solar que um particular local receberia se o Sol estivesse sempre a radiar a sua energia máxima, para um certo número de horas. A irradiância na superfície terrestre tem o seu pico por volta do meio-dia, e foi estimado em $1000 W/m^2$. Por exemplo, se um local recebe $8 kWh/m^2$ por dia, podemos dizer que recebe 8 horas de Sol por dia com o seu valor máximo $1 kWh/m^2$. A Figura 3.5 representa o valor de PSH recebido num dia limpo para um determinado local. O PSH é uma representação útil para comparar as

⁵ PSH – Do inglês “Peak Sun Hours”.

diferenças de energia recebidas diariamente, mensalmente, por estação, e anualmente para um determinado local, e também para comparação com outros locais.

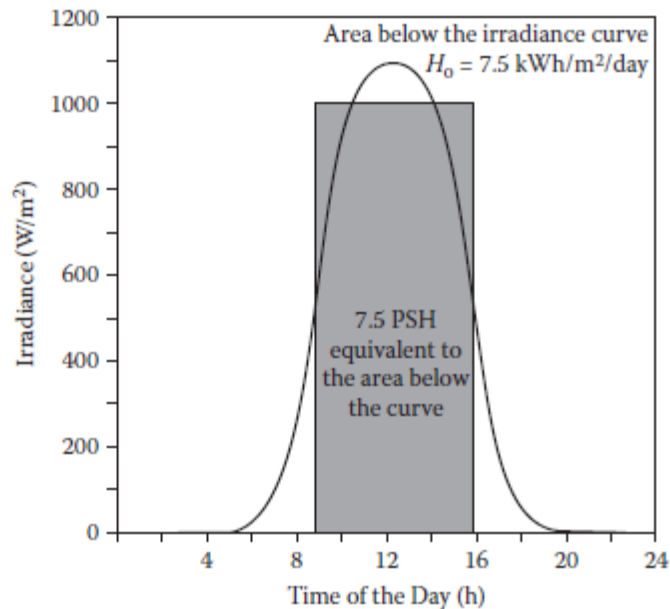


Figura 3.5 –Representação típica da radiação solar e do pico de horas de sol (PSH) para um dia limpo (Fonte: [15])

O valor de PSH de um determinado local é também usado como parâmetro de energia para dimensionar sistemas de células fotovoltaicas. Desta maneira, para o local em questão o critério de dimensionamento varia consoante o mês com o valor máximo de necessidade de energia, o mês com o valor mais baixo de PSH, ou a média anual de PSH.

3.2 Células fotovoltaicas

3.2.1 Princípio de funcionamento

As células fotovoltaicas são dispositivos que convertem a luz solar directamente em electricidade a partir de processos que se desenvolvem ao nível atómico nos materiais de que são constituídas – o efeito fotovoltaico. Foi baseado neste efeito que foram desenvolvidas as células PV. As células PV são constituídas por pelo menos duas camadas de material semicondutor onde é produzida a corrente eléctrica. O material semicondutor mais utilizado

nestas células é o silício, ao qual são adicionadas substâncias, ditas dopantes, de modo a criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão directa da potência associada à radiação solar em potência eléctrica DC. Uma destas camadas possui carga positiva (tipo N), e a outra carga negativa (tipo P). Quando a luz penetra a célula, alguns dos fotões provenientes desta luz são absorvidas pelos átomos do semiconductor, libertando electrões da camada negativa da célula (tipo P) que circulam através do circuito externo, voltando depois à camada positiva (tipo N). Este fluxo de electrões produz uma corrente eléctrica (Figura 3.6). A carga externa poderá ser vista como um dispositivo que necessite de corrente eléctrica, seja uma lâmpada, uma bateria ou até mesmo a rede eléctrica.

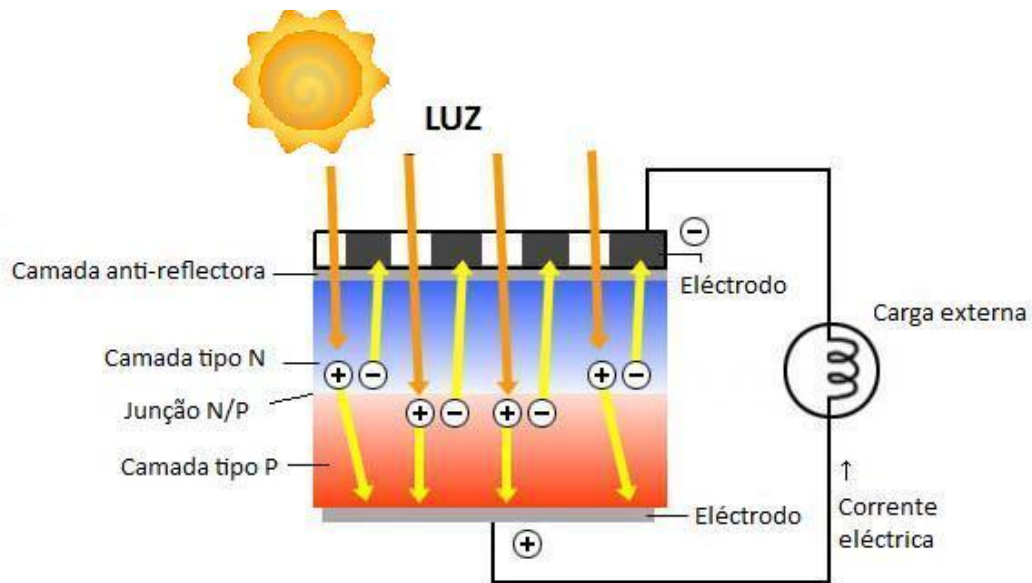


Figura 3.6 - Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica

(Adaptado de: www.apec-vc.or.jp/e/)

3.2.2 Condições de referência

O desempenho de um módulo de células fotovoltaicas é normalmente determinado através da sua exposição segundo as condições de referência para a radiação solar e temperatura (STC – *Standard Test Conditions*). As condições STC representam o *standard* mais usual na indústria e são usados para classificar e comparar células PV. Estas condições representam um conjunto de condições de teste em laboratório, que aproxima as condições em que as células fotovoltaicas podem ser utilizadas. Embora existam outras normas, que oferecem aproximações mais reais, as STC oferecem o padrão mais universal. O mesmo

padrão também é utilizado para avaliar possíveis locais de instalação. As condições de referência segundo as STC encontram-se na Tabela 3.1.

Condições STC	
Irradiância (W/m^2)	$G=1000$
Temperatura da célula ($^{\circ}C$)	$T=25$

Tabela 3.1 – Condições STC [17]

3.2.3 Circuito eléctrico equivalente simplificado

A complexa estrutura física de uma célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito eléctrico equivalente através de componentes eléctricos discretos, cujo comportamento é bem conhecido (Figura 3.7).

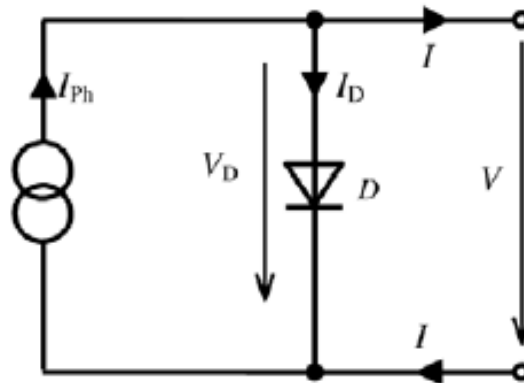


Figura 3.7 – Circuito eléctrico equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica [1]

Na Figura 3.7, o termo I_{ph} representa a corrente gerada a partir da potência solar que incide sobre célula solar, e é constante para uma determinada radiação solar incidente [16]. A corrente aos terminais do circuito que alimentará uma determinada carga (por exemplo uma simples lâmpada, ou a rede eléctrica) é dada por:

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Sendo que:

I_{ph} – Corrente gerada pela energia solar (A)

I_0 – Corrente inversa de saturação do diodo (A)

V – Tensão aos terminais da célula (V)

m – Factor de idealidade do díodo (díodo ideal: $m = 1$; díodo real: $m > 1$)

k - Constante de Boltzmann ($k = 1,381 * 10^{-23} \text{ J/K}$)

T – temperatura absoluta da célula em Kelvin (K) ($0^\circ \text{ C} = 273,15 \text{ K}$)

q – carga eléctrica do electrão ($q = 1,602 * 10^{-19} \text{ C}$)

3.2.4 Características I-V e P-V

Cada célula fotovoltaica possui características típicas de corrente – tensão e potência – tensão. A corrente de uma célula solar depende da carga aplicada e da quantidade de potência solar que recebe. Para uma certa potência solar incidente por unidade de superfície (G) e uma temperatura da célula fixa (T), a característica Corrente – Tensão típica de uma célula solar tem um andamento igual à Figura 3.8.

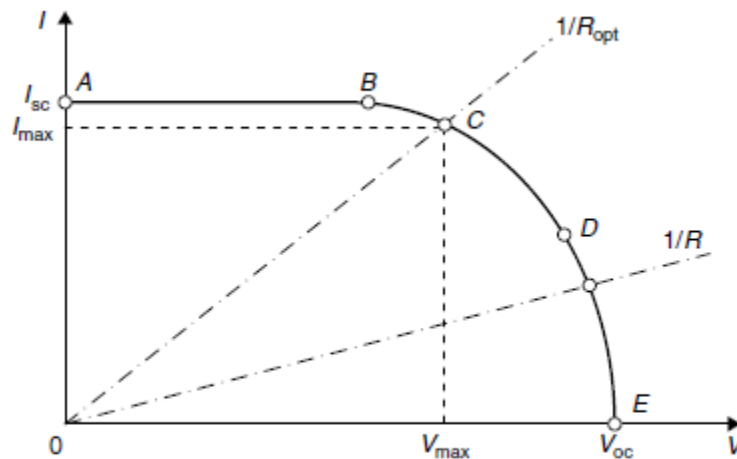


Figura 3.8 – Curva típica representativa de Tensão-Corrente de células fotovoltaicas [15]

Através do gráfico da Figura 3.8 pode-se observar dois parâmetros importantes, usados para descrever o desempenho da célula fotovoltaica: a tensão de circuito aberto V_{oc} , e a corrente de curto-circuito I_{sc} .

Quando é feito um curto-circuito à célula, a corrente atinge o seu valor máximo (I_{sc}) e a tensão através desta é zero.

$$\begin{aligned} V &= 0 \\ I_D &= 0 \\ I &= I_{ph} = I_{sc} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Quando o circuito da célula é aberto, a tensão atinge o seu máximo (V_{oc}).

$$I = 0$$

$$V_{OC} = m \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (3.3)$$

Sendo V_T designado por potencial térmico dado por:

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} (V) \quad (3.4)$$

Para ambos os parâmetros, os seus valores são característicos da célula solar em questão e dados pelos fabricantes para determinadas condições de radiação solar incidente e temperatura (condições STC).

Voltando à Figura 3.8, e para o circuito aberto ou para o curto-circuito, a potência é zero. Entre o circuito aberto e o curto-circuito, a potência de saída será maior que zero.

Se considerarmos que a célula solar é conectada a uma resistência variável, R , o seu ponto de funcionamento será determinado pela intersecção da característica I-V da célula solar com a característica I-V da carga. Na figura a característica I-V para uma carga resistiva é representada por uma linha recta com declive $1/V=1/R$. Para uma carga resistiva pequena, a célula funcionará na região AB da curva, onde a célula se comporta como uma fonte de corrente praticamente constante, quase igual à corrente de curto-circuito (I_{sc}). No entanto, para uma grande carga resistiva, a célula funcionará na região DE da curva, onde a célula se comporta mais como uma fonte de tensão constante, quase igual à tensão de circuito aberto (V_{OC}).

A partir da característica I-V Figura 3.8 e sabendo que a potência corresponde ao produto da corrente pela tensão, obtém-se o seguinte gráfico (Figura 3.9).

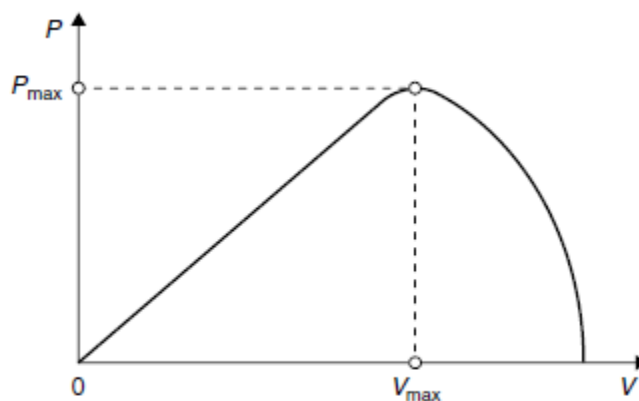


Figura 3.9 – Curva típica representativa de Tensão-Potência de células fotovoltaicas [15]

A potência eléctrica de saída será:

$$P = V \cdot I = V \cdot \left[I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \right] \quad (3.5)$$

A potência máxima obtém-se para $\frac{dP}{dV} = 0$:

$$e^{\frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} = \frac{\frac{I_{sc}}{I_0} + 1}{1 + \frac{q \cdot V}{m \cdot k \cdot T}} \quad (3.6)$$

A partir desta equação e por métodos iterativos podemos calcular a tensão máxima externa $V = V_{máx}$ e a correspondente corrente é $I_{máx}$. [16]

O valor máximo de potência (ponto C da Figura 3.8), que corresponde à potência máxima entregue à carga, é designado por ponto de máxima potência (MPP⁶) e dado por:

$$P_{MPP} = P_{máx} = V_{máx} \cdot I_{máx} < V_{OC} \cdot I_{sc} \quad (3.7)$$

Outro parâmetro importante é o factor de forma (*fill factor*- FF) e é definido por:

$$P_{máx} = V_{OC} \cdot I_{sc} \cdot FF$$

$$FF = \frac{P_{máx}}{V_{OC} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{máx} \cdot I_{máx}}{V_{OC} \cdot I_{sc}} \quad (3.8)$$

O factor de forma de uma célula fotovoltaica é definido como a relação (em percentagem) entre a potência máxima real obtida ($V_{máx} \cdot I_{máx}$) e a potência teórica ($V_{OC} \cdot I_{sc}$) e representa um critério de qualidade das células solares. Este valor é sempre menor que um, e encontra-se normalmente entre 0,5 e 0,85 [1]. É importante notar que tanto V_{OC} , I_{sc} como $P_{máx}$, $V_{máx}$, $I_{máx}$ são valores característicos da célula, e dados fornecidos pelo fabricante, normalmente calculados para as condições de referência STC (Tabela 3.1).

⁶MPP - Do inglês, *maximum power point*.

O rendimento de células solares fotovoltaicas é também normalmente calculado segundo as condições de referência STC, isto é, o quociente entre a potência eléctrica máxima de saída e a potência da luz solar incidente:

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{solar}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A \cdot G} = \frac{V_{m\acute{a}x} \cdot I_{m\acute{a}x}}{A \cdot G} \quad (3.9)$$

Onde, “A” representa a área da célula (m^2), e “G” a radiação solar incidente por unidade de superfície (W/m^2).

3.2.5 Influência da irradiância e temperatura

Os dois grandes factores que influenciam a potência eléctrica gerada pelas células fotovoltaicas são sem dúvida a irradiância e a temperatura da célula. A característica I-V para uma célula solar na Figura 3.8 é válida para uma certa radiação solar e temperatura da célula (tipicamente as condições STC)

A Figura 3.10 mostra a característica I-V a variar com a irradiância incidente. A corrente de curto-circuito I_{sc} aumenta linearmente com a irradiância, enquanto a tensão de circuito aberto V_{oc} varia pouco. Desta forma a potência de saída aumenta também com o aumento da irradiância.

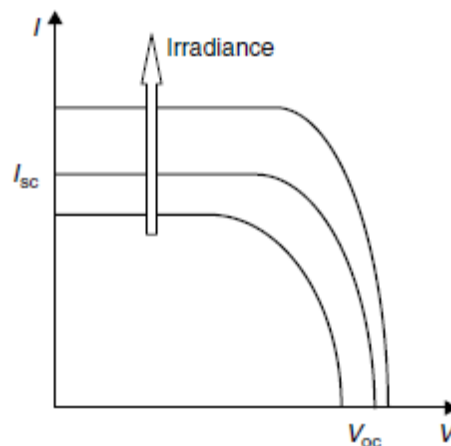


Figura 3.10 – Influência da irradiância nas características I-V nas células fotovoltaicas
(Fonte: [15])

A influência da temperatura da célula nas características da célula é representada na Figura 3.11. O maior efeito do aumento da temperatura da célula é na tensão de circuito aberto V_{oc} (equação 2.3), que diminui proporcionalmente com a temperatura, no entanto a corrente

de curto-circuito I_{sc} varia muito pouco, e por vezes é desprezada para cálculos [15]. A potência de saída decresce também com o aumento da temperatura, tal como o rendimento da célula.

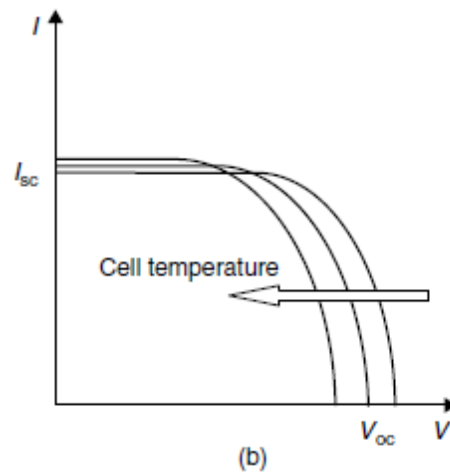


Figura 3.11 – Influência da temperatura da célula nas características I-V nas células fotovoltaicas (Fonte: [15])

Analisando o comportamento de uma célula solar face às variações de temperatura e irradiância incidente, verificamos que a sua potência máxima (potência MPP) e rendimentos estão fortemente dependentes destes dois parâmetros. A potência eléctrica produzida pelas células fotovoltaicas é fortemente dependente das condições meteorológicas existentes. No aproveitamento do recurso solar através de sistemas fotovoltaicos torna-se crucial o conhecimento das condições meteorológicas localmente, de forma a analisar o seu comportamento e otimizar o seu funcionamento.

Capítulo 4

Medição das condições meteorológicas

Nos capítulos anteriores foi possível descrever de uma maneira simplificada a influência que as condições meteorológicas têm nos sistemas de energias renováveis. A grande variabilidade dos factores meteorológicos no tempo e no espaço condicionam muito a potência produzida por estes sistemas de energia, sendo que a medição das condições torna-se uma forma de dinamizar e melhorar os seus desempenhos.

O conhecimento preciso das condições meteorológicas apenas será possível através de equipamento específico capaz de fazer uma leitura precisa e rigorosa. De seguida são descritos vários sensores utilizados para obter dados sobre o vento, temperatura e radiação solar.

4.1 Medição do vento

O vento possui duas características principais – velocidade e direcção - que interessam considerar para o aproveitamento eólico. Estas características podem ser medidas através de instrumentos específicos para o efeito. É importante que estes instrumentos estejam afastados o suficiente de obstáculos, para que exista uma aquisição de dados o mais próximo das características reais do vento. Os obstáculos devem estar situados a uma distância de, pelo menos, dez vezes a sua altura [16]. Quando usados para monitorizar ou controlar a turbina eólica devem ser colocados à mesma altura que esta, para resultados experimentais mais reais. A presente Dissertação tem como objectivo parcial a monitorização de uma turbina eólica, tendo existido a preocupação de colocar o instrumento de aquisição aproximadamente à mesma altura da turbina, como será abordado no Capítulo 5.

4.1.1 Velocidade do vento

A velocidade do vento é sem dúvida o parâmetro mais importante do vento a ser medido [18]. A velocidade do vento é medida com um instrumento chamado anemómetro. Através do anemómetro a velocidade do ar é convertida num movimento rotativo que por sua vez é convertido num determinado valor de saída eléctrico. Existem vários tipos de anemómetros:

- Mecânicos (os mais comuns);
- Ultra-sónicos;
- Termo-diferenciais.

Os típicos anemómetros mecânicos consistem normalmente num conjunto de pás que rodam devido ao vento, e podem ser omni-direccionais ou direccionais.

Os omni-direccionais são desenhados para que, independentemente da direcção do vento, a força do vento cause um movimento rotacional de pás. O anemómetro sem dúvida mais usado é o chamado *anemómetro de copos* que possui três pás curvadas (*copos*) horizontais ligadas a um eixo de rotação vertical (Figura 4.1).



Figura 4.1 – Anemómetro de copos (Fonte: www.sciencescope.co.uk)

Os anemómetros mecânicos direccionais normalmente possuem as pás verticais, e acompanham a direcção do vento com a ajuda de um estabilizador vertical (mecanismo também usado para determinar a direcção do vento). Um exemplo de um anemómetro deste tipo é mostrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Anemómetro direccional (Fonte: www.nssl.noaa.gov)

Tanto os anemómetros mecânicos omni-direccionais como os direccionais convertem a velocidade do vento - através de um pequeno gerador ligado às pás rotacionais - numa determinada tensão eléctrica proporcional [18].

Os anemómetros ultra-sónicos funcionam usando o efeito de *Doppler*. Este efeito consiste na variação da frequência recebida por um receptor de sons quando o emissor e o receptor se movem um em relação ao outro. Um bom exemplo deste efeito acontece quando um carro passa por nós a buzinar, e o tom do som da buzina é diferente à medida que o carro se aproxima ou se afasta.

Através do tempo de deslocamento de pulsos sónicos entre pares de transdutores os anemómetros ultra-sónicos são capazes de medir a velocidade do vento quase instantaneamente. As medições dos pares de transdutores podem ser combinados de forma a conseguir uma medida do fluxo, em 1, 2 ou 3 dimensões. As Figuras 4.3 e 4.4 mostram anemómetros de duas e três dimensões.



Figura 4.3 – Anemómetro 2-D capaz de medir a velocidade e direcção do vento
(Fonte: www.novalynx.com)



Figura 4.4 – Os anemómetros em 2-D ignoram a componente vertical do vento. Este anemómetro 3-D mede a velocidade do vento em três dimensões baseada no tempo de deslocamento de sinais acústicos ultrasónicos. (Fonte: www.novalynx.com)

Os anemómetros ultra-sónicos são também capazes de medir a direcção do vento e ventos turbulentos, mas costumam ser bastante caros, necessitam de alimentação para funcionar, e são pouco fiáveis para grandes períodos de exposição no exterior [18].

Existe outro princípio usado para medir a velocidade do vento, que consiste em medir a temperatura. Com a ajuda de um termístor, sensível à temperatura, é possível calcular a velocidade do vento. Quanto maior a velocidade do vento, mais arrefecimento existirá. A maior parte dos sensores termo-diferenciais usam um segundo sensor de temperatura como referência, para determinar a temperatura ambiente. Este tipo de sensores são bastante robustos, embora necessitem de uma considerável energia para funcionar, como os ultra-sónicos.

Muitas vezes o nome anemómetro está relacionado com instrumentos que para além de medir a velocidade do vento também medem a sua direcção. Existem também anemómetros de pressão, que medem a pressão atmosférica, mas estes instrumentos não serão discutidos no presente documento.

4.1.2 Direcção do vento

A direcção do vento é normalmente medida através de um sensor de direcção, basicamente constituído por um estabilizador vertical rotativo ligado a um eixo vertical, como mostra a Figura 4.5.



Figura 4.5 – Sensor de direcção de vento

(Fonte: www.envcoglobal.com)

Este estabilizador vertical é ligado a um sensor que converte a posição para um sinal eléctrico possível de se medir. Existem tipicamente três tipos de sensores de direcção: resistivos, magnéticos e os menos usuais os ópticos. Os resistivos dizem respeito a potenciómetros que utilizam contactos deslizantes para introduzir uma variação na tensão eléctrica, enquanto os magnéticos, normalmente dizem respeito a sensores de posição por efeito de Hall, que usam este efeito para produzir uma tensão eléctrica sem a necessidade de contacto. Os sinais eléctricos são normalmente decodificados para graus azimutais (0 -> 360°) correspondendo a pontos cardeais, colaterais e subcolaterais (Capítulo 2).

4.2 Medição da radiação solar

O conhecimento da radiação solar num determinado local torna-se um parâmetro muito importante para os sistemas que tirem partido da energia solar – sistemas solares térmicos ou sistemas fotovoltaicos. Desta forma estes dados podem contribuir para actividades como pesquisa e desenvolvimento, controlo de qualidade de produção, a determinação de locais óptimos, a monitorização da eficiência dos sistemas instalados e a previsão das potências de saída dos sistemas, para determinadas condições de radiação solar. Os sistemas de células

fotovoltaicas têm a maior parte da sua sensibilidade entre os 400 e os 1100 nm de comprimento de onda (Capítulo 3).

Nem toda a energia proveniente do Sol chega à superfície terrestre. Alguma dessa energia é reflectida de volta para o espaço e outra absorvida pela atmosfera. Desta forma, e com instrumentos capazes, é possível medir as componentes directa e difusa da radiação, tal como a soma das duas, isto é, a radiação solar global.

Os instrumentos para medir a radiação solar são classificados com base em vários critérios: o tipo de variável a medir, o campo de “visão”, a resposta espectral, a aplicação especial, entre outras [4]. Os instrumentos mais comuns usados actualmente são baseados nos efeitos termoeléctrico e fotoeléctrico [15]. O efeito termoeléctrico consiste na conversão directa de diferenças de temperatura numa tensão eléctrica e vice-versa. Este efeito é conseguido usando uma termopilha⁷ que consiste num conjunto de termopares⁸ ligados em série. Desta forma é produzida uma pequena corrente proporcional à temperatura. Esta corrente é também proporcional à radiação solar que atinge este sistema. Os sensores fotovoltaicos são mais simples e têm uma resposta instantânea e uma boa estabilidade em geral. O efeito fotovoltaico acontece quando a radiação solar atinge um sensor sensível à luz levando a que átomos no detector absorvam alguma energia dos fotões. Neste estado excitado, que pode ser produzido por uma luz num intervalo específico de comprimentos de onda, os átomos libertam electrões, que fluem através de um condutor para produzir uma corrente eléctrica. A corrente é também proporcional à intensidade da radiação que atinge o detector/sensor [15].

Os tipos de instrumentos são definidos pela *World Meteorological Organization* (WMO) e pela *International Standards Organization* (ISO). Existem basicamente dois tipos de instrumentos de medição:

- o piranómetro;
- e o pireliómetro.

O piranómetro é usado para medir a radiação solar total (difusa mais directa) dentro de um campo hemisférico de visão, enquanto o pireliómetro é usado para medir a radiação solar directa numa incidência normal da radiação [17].

⁷ Uma termopilha é o nome que se dá a um conjunto de termopares ligados em série

⁸ Um termopar representa uma junção entre dois tipos diferentes de metais que produz uma tensão proporcional a uma diferença de temperatura. Os termopares são dispositivos eléctricos com larga aplicação para medição de temperatura.

O piranómetro baseado em termopilhas - ou radiómetro⁹, que normalmente é constituído por um conjunto de termopares (termopilha) – responde termicamente à quantidade de radiação solar e mede a energia do Sol de todas as direcções no hemisférico acima do plano do instrumento. Normalmente possui uma cúpula de vidro com uma vista hemisférica do céu que tem como função transmitir radiação solar num grande intervalo de comprimentos de onda e é isolada termicamente do sensor (Figura 4.7 e Figura 4.6). O piranómetro é também capaz de medir a radiação solar difusa se for usado um sistema de sombreamento bloqueando o sensor da radiação solar directa (Figura 4.8).



Figura 4.7 – Piranómetro *Eppley Model PSP*, instrumento de referência de primeira classe, definido pela *WMO* [15]

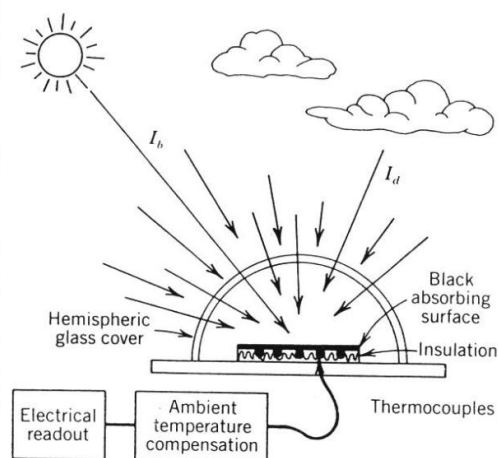


Figura 4.6 –Piranómetro com temopilha em pormenor (Fonte: www.powerfromthesun.net)



Figura 4.8 – Piranómetro com um sistema de sombreamento para medição da radiação difusa. Este sistema necessita do ajuste à órbita do Sol regularmente (Fonte: www.volker-quaschnig.de)

⁹ Um radiómetro é um dispositivo para medição de fluxo radiante (potência) de uma radiação electromagnética.

Infelizmente piranómetros precisos baseados em termopilhas (radiómetros) são bastante caros. Existe uma alternativa mais barata usando piranómetros baseados em silício (Figura 4.10 e Figura 4.9), tal como as células fotovoltaicas. Tal como todos os piranómetros anteriores é produzido um sinal eléctrico proporcional à intensidade da radiação solar, mas em vez de termopilhas este tipo usa fotodiodos¹⁰ para a medição da radiação solar. Este tipo de instrumentos possui uma resposta quase instantânea, mas não respondem uniformemente a toda a gama de radiação emitida pelo Sol. A resposta espectral é tal que é mais sensível à radiação infravermelha do espectro solar [19].



Figura 4.9 – Piranómetro baseado em silício
(Fonte: www.kippzonen.com)



Figura 4.10 – Piranómetro com fotodiodo decélula silício
(Fonte: www.apogeeinstruments.com)

Um piranómetro ideal é capaz de medir todo o espectro solar, entre 280 a 2800 nm (Capítulo 3). No entanto, cerca de 90% da energia da luz solar está entre os 300 a 1100 nm. Todos os piranómetros são projectados para serem usados numa posição horizontal permanente para a qual foram calibrados.

O pireliómetro é projectado para captar a luz solar vindo directamente do Sol e normalmente é também munido de um radiómetro como sensor. A radiação solar directa é captada através da montagem de um sensor na base de um tubo apontado directamente para o Sol. O tubo está normalmente projectado para aceitar radiação num raio de 5 graus (Figura 4.12). Como o pireliómetro necessita de estar constantemente a apontar para o centro do Sol é usado um sistema de seguimento solar [17].

¹⁰ Um fotodíodo é um tipo de fotodetector capaz de converter luz numa corrente ou tensão eléctricas, dependendo do modo de operação.



Figura 4.11 – Pireliómetro capaz de medir radiação solar directa, seguindo continuamente o Sol
(Fonte: www.volker-quaschning.de/)

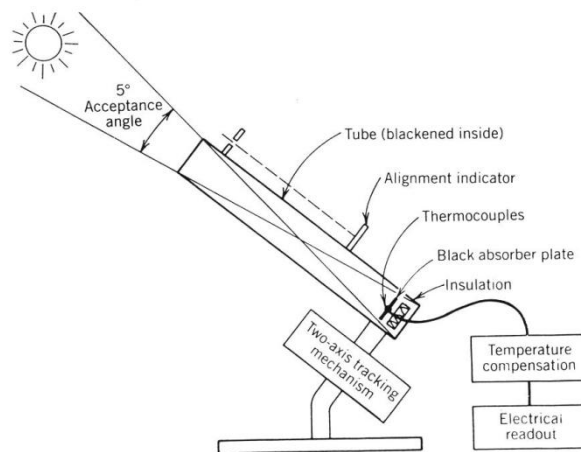


Figura 4.12 – Pireliómetro em pormenor (Fonte: www.powerfromthesun.net)

4.3 Medição da temperatura

A temperatura pode ser definida como a quantidade de calor que um objecto ou o ar contém. Do ponto de vista da actividade molecular, a temperatura pode ser vista como a medida da energia cinética associada ao movimento aleatório das partículas que compõem um determinado sistema físico (um objecto ou o ar por exemplo). Ligado ao conceito de calor está a transferência de calor ou transferência de energia térmica. Quando existe uma diferença de temperatura entre dois sistemas, o calor é transferido do sistema de maior temperatura para o de menor temperatura até ser atingido um equilíbrio térmico.

A medição da temperatura representa um dado importante para sistemas de energias renováveis. No caso da energia eólica, quando maior a velocidade do vento maior é o arrefecimento do ar, existindo inclusive, instrumentos capazes de medir a velocidade do vento consoante a temperatura do ar (secção 4.1). Em relação a sistemas de células fotovoltaicas vimos também que quanto maior a temperatura pior será o desempenho destes sistemas. Para sistemas térmicos solares quanto maior a temperatura melhor serão os seus desempenhos, visto que o seu objectivo passa por aproveitar a temperatura para aquecimento de água, secagem, entre outros.

Em termos de escala, a temperatura pode ser definida em graus Celsius (°C), graus Fahrenheit (°F) e Kelvin (K). A unidade da temperatura no S.I. é o Kelvin (K), embora se use para aplicações diárias a unidade Celsius (°C). É possível converter cada uma das escalas noutra escala, segundo as seguintes equações:

$$K = ^\circ C + 273,16$$

$$^\circ C = \frac{(^{\circ}F - 32)}{1,8} \quad (4.1)$$

A seguinte tabela mostra alguns valores comparativos de temperaturas entre as diferentes escalas:

Tabela 4.1 – Diferentes escalas de temperatura

Temperatura	Kelvin (K)	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)
Zero absoluto	0	-273,16	-459,7
Ponto congelamento da água	273,16	0	32
Ponto de ebulição da água	373,16	100	212
Temperatura de um quarto	294,2	21,1	70
Dia muito quente	313,16	40	104

Para a medição da temperatura são usados vários tipos de instrumentos, e todos eles deduzem a temperatura através da mudança de alguma característica física de um material que varia com a temperatura. Existem vários tipos de dispositivos capazes de medir a temperatura, dos quais os mais comuns:

- Termómetros de expansão de fluidos;
- Termómetros bimetalícos;
- Termopares;
- Termorresistências (*RTD*, do inglês Resistance Thermometer Detector);
- Termístores (representa um tipo de termorresistência);
- Semicondutores;
- Pirómetros.

4.3.1 Termómetros de expansão de fluidos e bimetalícos

A maioria dos primeiros termómetros usava a expansão térmica de um material como base para a medição da temperatura. Dentro deste tipo de termómetros mecânicos podemos incluir os Termómetros de expansão de fluidos e os Termómetros bimetalícos. Este tipo de instrumentos não consegue gerar dados que podem ser facilmente gravados ou transmitidos, ao contrário dos instrumentos estudados anteriormente nas secções 4.1 e 4.2, que geram uma tensão eléctrica possível de ser facilmente tratada e utilizada.

Dentro dos Termómetros de expansão de fluidos e entre os mais comuns temos: os que usam mercúrio e os que usam um líquido orgânico – existem também alguns que usam um gás em vez de um líquido. Ambos consistem num tubo de vidro graduado com um reservatório de líquido no fundo e selado em cima. À medida que o líquido expande, é forçado a subir através do tubo. A temperatura é lida através da comparação da altura que o líquido com as marcas graduadas no vidro. Estes termómetros são usados por exemplo para medir a febre, para medir a temperatura no interior ou exterior de edifícios ou até mesmo piscinas.

Os Termómetros bimetalícos tiram partido de diferentes coeficientes de expansão térmica entre diferentes metais. Normalmente usam uma bobina feita de dois metais diferentes com diferentes coeficientes de expansão térmica ligada a um ponteiro. À medida que a bobina aquece, esta expande, causando um movimento rotacional do ponteiro num mostrador/indicador graduado com valores diferentes de temperatura [18]. Este tipo de termómetros são bastante robustos e possuem um maior alcance de medição de temperatura que os termómetros de expansão de fluidos; normalmente possuem uma menor precisão do que os termopares ou as termorresistências.

Os termómetros de expansão de fluidos e bimetalícos são óptimos para uma observação dos valores de temperatura instantaneamente se estivermos a olhar para estes instrumentos, mas se quisermos guardar estes valores, a solução será usar instrumentos que traduzam a temperatura numa tensão eléctrica que poderá ser acondicionada e guardada.

4.3.2 Termopares

Os termopares representam os dispositivos eléctricos mais usados e simples para medir a temperatura. Estes dispositivos consistem essencialmente em duas tiras ou fios de metais diferentes ligados (Figura 4.13). Baseados no efeito de *Seebeck*, quando a junta que une os dois metais diferentes é aquecida, é produzida nessa junta uma baixa tensão eléctrica. Esta tensão é proporcional à temperatura. Quanto mais quente a ligação, maior a tensão, embora não necessariamente linear. Os termopares são classificados consoante os metais que são produzidos (Tabela 4.2).



Figura 4.13 – Termopar do tipo K usado num forno eléctrico

(Fonte: www.madwizard.org)

Os termopares apresentam várias vantagens como o seu baixo custo, são bastante robustos e confiáveis, apresentam um grande alcance de temperatura, uma baixa impedância e a variação de um termopar para outro é bastante pequena, não necessitando normalmente de recalibração [18]. No entanto a tensão gerada é baixa, e não linear com a temperatura - normalmente são usadas tabelas ou equações predefinidas para converter a tensão para a respectiva temperatura.

Tabela 4.2 – Tipos de Termopares

Tipo	Metal 1	Metal 2	Intervalo Nominal de Temperatura
J	Ferro	Cobre-Níquel	0 => 750 °C
K	Níquel-Crómio	Níquel-Alumínio	-200 => 1250 °C
E	Níquel-Crómio	Cobre-Níquel	-200 => 900 °C
T	Cobre	Cobre-Níquel	-250 => 300 °C

4.3.3 Termorresistências e termístores

As termorresistências (*RTD*, do inglês *Resistance Thermometer Detector*) são dispositivos cuja resistência eléctrica muda com a temperatura. Existem dois tipos de termorresistências: os dispositivos metálicos (normalmente referidos como *RTDs*), e os termístores. Os *RTDs* são baseados na mudança da resistência de um metal, com esta a aumentar praticamente linearmente com a temperatura. Os termístores são baseados na mudança da resistência de um semicondutor cerâmico, onde esta diminui não linearmente com o aumento da temperatura.

O termo *thermistor* (termístor) vem da união de duas palavras: *thermal* (térmico) e *resistor* (resistência). Existem basicamente dois tipos de termístores: Coeficiente de Temperatura Negativo (NTC – do inglês *Negative Temperature Coefficient*) e Coeficiente de Temperatura Positivo (PTC – do inglês *Positive Temperature Coefficient*). Desta forma, a resistência dos termístores do tipo NTC decresce com o aumento da temperatura, enquanto a resistência do tipo PTC aumenta com o aumento da temperatura. Os termístores são caracterizados por dois factores: a sua resistência nominal à temperatura de 25°C, e a taxa de variação da resistência consoante a temperatura. Como este tipo de dispositivos podem ser muito pequenos, são muitas vezes usados dentro de outros dispositivos como sensores de temperatura ou dispositivos de rectificação/correção.



Figura 4.15 – Termístores do tipo NTC

(Fonte: www.gr.digikey.com)



Figura 4.14 – Termístores do tipo PTC

(Fonte: www.jestineyong.com)

4.3.4 Semicondutores

Os termómetros semicondutores são normalmente produzidos na forma de circuitos integrados e traduzem a temperatura na forma de uma tensão ou corrente eléctrica ou de um sinal digital [20].

Os mais comuns são basicamente díodos. Se uma corrente atravessar um díodo (ou um transístor configurado como um díodo), a queda de tensão desenvolvida varia com a temperatura. Desta forma, é possível converter esta tensão para um certo valor de temperatura.

Muitas vezes a estes díodos, tal como a maior parte dos equipamentos de instrumentação existente, é adicionado uma electrónica de condicionamento de sinal para conseguir uma saída linear calibrada. Muitos dos semicondutores fornecem esta saída na forma de uma tensão, corrente ou um sinal digital [18]. Este tipo de dispositivos possui menor alcance de medição de temperaturas do que os termopares ou *RTDs*, mas podem ser bastante precisos, baratos e muito fáceis de usar e de serem interligados com outro tipo de electrónica para controlo e visualização.

4.3.5 Pirómetros

Até agora apenas se descreveram dispositivos capazes de medir a temperatura que necessitam de estar em contacto directamente com o corpo ou ambiente em questão. Estes sensores de temperatura sem contacto interceptam e medem a radiação térmica emitida pela superfície de um certo material. Desta forma não existe a necessidade de existir contacto directo entre estes dispositivos e o objecto que se quer medir a temperatura ao contrário dos termopares ou *RTDs*. Estes sensores são úteis principalmente para medições de temperatura em objectos em movimento ou superfícies que não podem ser tocadas ou alcançadas facilmente.

Normalmente estes tipos de instrumentos dividem-se em pirómetros de radiação e pirómetros ópticos. Os pirómetros de radiação determinam a temperatura de um objecto pela radiação (infravermelha, e se presente, luz visível) que este emite. Os pirómetros ópticos determinam a temperatura de um objecto pela cor da luz visível que este emite.



Figura 4.16 – Operador a verificar a temperatura do sistema de ventilação

(Fonte: www.news.navy.mil)

Existem muitas variações deste tipo de instrumentos, no entanto este assunto foge um pouco ao intuito desta Dissertação, de modo que este tipo de sensores não será mais aprofundado.

4.4 Estações Meteorológicas

Uma estação meteorológica não é mais do que um sistema que interliga vários sensores (como os descritos anteriormente) capazes de retirar informação sobre as condições meteorológicas, com um *datalogger* capaz de processar e gravar esses dados e transferi-los para um computador pessoal. Um *datalogger* (ou *data recorder*) consiste num dispositivo electrónico que é usado para gravar dados numa memória interna local, durante um certo período de tempo. Normalmente são bastante pequenos, alimentados por baterias, e constituídos por um microprocessador e uma memória interna. Alguns possuem sensores internos, ou ligação para vários sensores. A ligação ao computador pessoal poderá ser feita por porta USB, série ou paralela. Os *dataloggers* usados nas estações meteorológicas normalmente encontram-se em caixas isolantes para evitar danos devido às condições meteorológicas adversas, preparados assim, para uma exposição contínua no exterior.

Resumindo, uma estação meteorológica é normalmente constituída por um *datalogger* e vários sensores ligados a este, entre eles os mais comuns:

- Termómetros - medição de temperatura;
- Higrómetros - medição de humidade atmosférica
- Anemómetros - medição de velocidade/direcção do vento;
- Sensores de direcção do vento (*Weather vane*);
- Barómetros – medição de pressão atmosférica;
- Piranómetros – medição de radiação Solar;
- Pluviómetros – medição de precipitação;

Muitas estações meteorológicas são usadas para adquirir e processar dados meteorológicos para várias áreas e propósitos tais como previsão das condições climáticas; agricultura; monitorização da qualidade do ar; estudos ecológicos/biológicos/microclimáticos; aeroportos e portos; segurança em pontes; monitorização de sistemas de energia renovável, entre outros.

4.5 Estado da arte

Nesta secção será feita uma análise comparativa de vários sistemas de monitorização comerciais e de sistemas de monitorização e correlação não comerciais.

4.5.1 Sistemas de Monitorização comerciais

Existem actualmente um vasto leque de sistemas capazes de ler as condições meteorológicas - estações meteorológicas – para vários tipos de utilizador. Desde a básica estação meteorológica (capaz de medir temperatura, humidade e pressão barométrica) até à mais avançada (capaz de medir o vento, precipitação e várias componentes de radiação solar) é importante definir o que se pretende medir, e com que propósito. Tipicamente estes sistemas disponíveis no mercado apenas permitem a monitorização das condições meteorológicas.

Entre vários modelos de estações decidiu-se analisar dois modelos disponíveis no mercado, visto serem dos mais populares entre este tipo de equipamento e serem ambos de empresas especializadas em instrumentação meteorológica:

- *Davis Instruments - Vantage Pro 2;*
- *Campbell Scientific - Basic Weather Station BWS200 Series;*

Davis Instruments - Vantage Pro 2

O modelo *Vantage Pro 2* da *Davis Instruments* consiste numa estação meteorológica e pode ser adquirida com um número variável de sensores, na versão com fios (*Cabled*) ou sem fios (*Wireless*), consoante o desejo do utilizador. A versão base deste modelo (basic/standard) inclui os sensores que permitem medir velocidade do vento, direcção do vento, humidade relativa do ar, temperatura ambiente e ainda pluviosidade, montados praticamente numa só peça. Os sensores de temperatura e humidade encontram-se dentro de um escudo de radiação, protegendo-os do calor derivado da radiação solar e reduzindo assim os erros de temperatura associados. O anemómetro possui um cabo e pode ser colocado noutro local específico. Existe a possibilidade de adicionar mais sensores à estação como o sensor de radiação solar, sensor de raios ultravioletas (UV) e sensor de humidade do solo e folhas.



Figura 4.17 – Estação meteorológica Davis Vantage Pro 2

(Fonte: www.davisnet.com)

Estes sensores são ligados a um transmissor que transmite os dados para uma consola. Através do transmissor, a versão com fios envia esses dados usando um cabo que pode ter um comprimento máximo de 300 metros, enquanto a versão sem fios usa comunicação rádio de baixa potência que pode transmitir até cerca de 300 metros num campo de visão aberto. A versão sem fios possibilita a retransmissão de dados entre várias consolas. Existe também a possibilidade adicionar alguns dos sensores sem fios, que transmitem directamente para a consola, para uma distribuição de sensores mais flexível.

A consola consiste num receptor que armazena os dados dos sensores e os processa e possui sensores internos de temperatura, humidade e pressão barométrica. Na versão com fios a consola é ligada ao transmissor alimentando-o. A consola por sua vez é alimentada por um adaptador de CA e possui 3 baterias do tipo C como *backup*. Na versão sem fios não é necessária a alimentação com o adaptador CA, visto que as mesmas 3 baterias do tipo C possuem uma autonomia de mais de 9 meses, segundo o fabricante. No caso da versão sem fios, o transmissor é alimentado por energia solar e possui baterias de *backup*. A consola possui um *LCD* onde todos os dados capturados pelos sensores podem ser visualizados. É possível aceder à informação sobre as condições meteorológicas no próprio momento, visualizar o histórico e uma previsão das condições futuras, tal como definir alarmes, configurar parâmetros da estação, visualizar gráficos, seleccionar sensores, entre outras. Esta consola permite a ligação com um computador pessoal, para que os dados possam ser acedidos por um software específico (Figura 4.18).

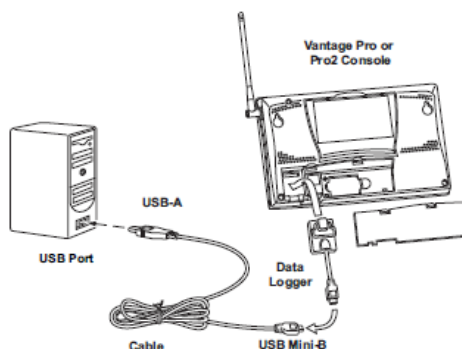


Figura 4.18 – Ligação da consola Davis Vantage Pro 2 a um computador pessoal [37]

Para isso é necessária a compra de um pacote chamado *WeatherLink* que é constituído por um *datalogger* e um *software* específico da *Davis Instruments*, compatível com este e vários outros modelos. Este *datalogger* pode ser ligado a um computador pessoal através da combinação deste com a consola, ou de um dispositivo *Weather Envoy*. Este dispositivo combinado com o *datalogger* é capaz de receber dados do transmissor ligado aos sensores sem ser necessária a consola e transferi-los para o computador. O *datalogger* é normalmente ligado por USB ao computador pessoal (Figura 4.19).

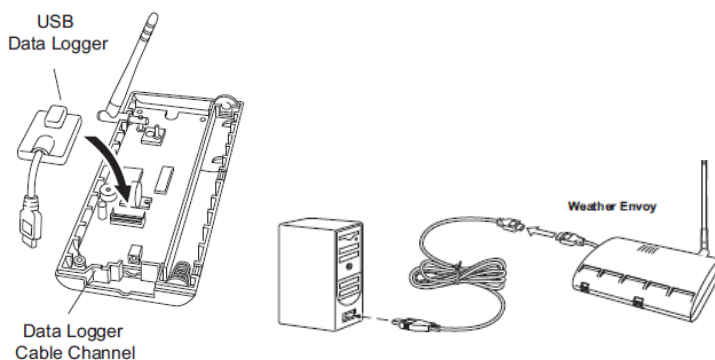


Figura 4.19 – Ligação do *Weather Envoy*. a um computador pessoal [38]

O *datalogger* tem a capacidade de armazenar um número limitado de registos. É possível escolher-se o intervalo de gravação de dados, e consoante este intervalo, terá um número de horas limitado de armazenamento de dados. Para um intervalo mínimo de gravação de 1 minuto, será capaz de gravar dados durante 42 horas, enquanto para um intervalo máximo de 120 minutos, será capaz de gravar 213 dias. Os dados incluem a hora e

data de gravação, e vários valores obtidos pelos sensores específicos, entre outros registos de identificação. Estes dados podem mais tarde ser transferidos para o computador com o auxílio do *software* de nome *WeatherLink*. Este *software* permite a visualização em tempo-real das condições meteorológicas e o tratamento destes dados, criando gráficos diários, semanais ou anuais sobre as leituras dos sensores de uma ou mais estações meteorológicas (Figura 4.20).

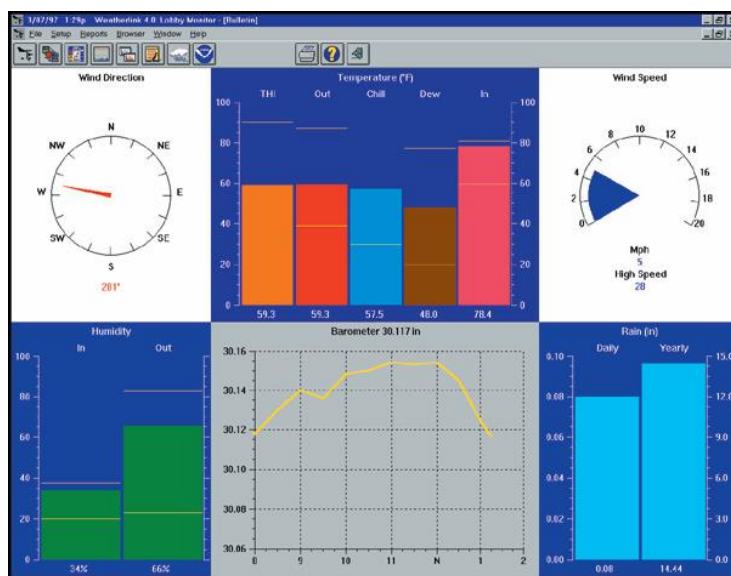


Figura 4.20 – Interface do programa *WeatherLink*

(Fonte: www.davisnet.com)

A *Vantage Pro 2* representa mais do que uma simples estação meteorológica caseira e é uma das melhores opções em termos de versatilidade, tendo boas referências por parte de muitos utilizadores privados ou estabelecimentos escolares e científicos. Este modelo tem uma das melhores relações preço/qualidade para estações meteorológicas. No entanto para o utilizador mais avançado que pretende sensores específicos vê-se obrigado a comprar uma estação base com sensores que não necessita. A quantidade exagerada de alarmes, gráficos e opções disponíveis na consola pode ser considerado desnecessário para algum tipo de utilizador.

Campbell Scientific - Basic Weather Station BWS200 Series

A empresa *Campbell Scientific* oferece uma vasta gama de equipamentos para a monitorização meteorológica. Dependendo do utilizador, a *Campbell* comercializa estações meteorológicas “pré-configuradas” com um conjunto de sensores e *datalogger*, ou existe a

hipótese de se configurar a sua própria estação escolhendo o *datalogger* e sensores específicos para satisfazer o utilizador mais avançado. Decidiu-se analisar um modelo de uma estação meteorológica “pré-configurada”, o modelo *Basic Weather Station BWS200 Series*.

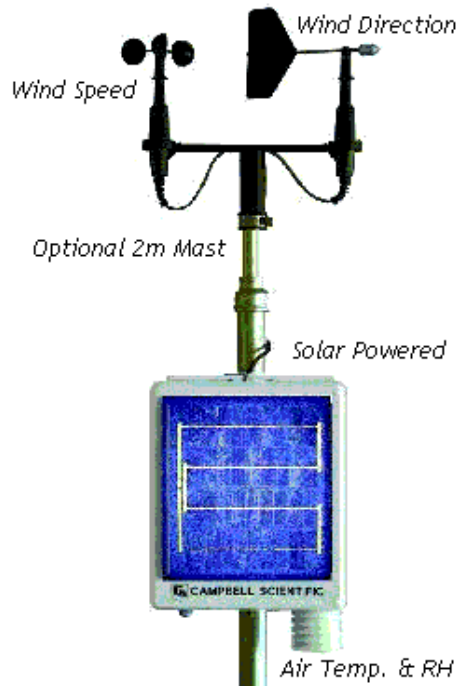


Figura 4.21 – Basic Weather Station BWS200 Series

(Fonte: www.campbellsci.com)

Este modelo base pode ser adquirido na versão com ou sem fios e é constituída por um conjunto de sensores, uma caixa isolante que contém um *datalogger* (modelo CR200/CR216) e a fonte de alimentação recarregável, e um painel solar de 5 Watts que ajuda a manter as baterias carregadas. A versão sem-fios inclui um transmissor de rádio com um alcance de aproximadamente 1 km num campo de visão aberto. A estação vem com sensores que são ligados e alimentados pelo *datalogger* capazes de medir: velocidade e direcção do vento, temperatura e humidade relativa. Para a medição da radiação solar e da precipitação sensores adicionais terão de ser comprados. O *datalogger* já incluído, onde todos os sensores são conectados é responsável pelo armazenamento e tratamento de dados de leitura dos sensores, e permite gravar 512 kbytes em memória equivalente a aproximadamente 128.000 leituras.

Os dados guardados em memória pelo *datalogger* podem ser transferidos para um computador pessoal através de um cabo RS232, para distâncias aconselhadas até 15 metros. A versão sem fios deste modelo permite uma comunicação para distâncias até 1 km em campo de visão aberto. Para distâncias maiores é possível existir a compra de hardware próprio para

uma comunicação por GSM, GPRS, linha fixa de telefone, modems de pouco alcance ou satélite. A ligação entre o *datalogger* e o computador é feita através de um software bastante simples, o PC200W, fornecido com a compra desta estação. Este software permite tanto a recepção de dados guardados no *datalogger* como de dados em tempo real referentes aos sensores. Permite também definir algumas configurações do *datalogger* como o relógio, e enviar simples programas que o controlam.

Apesar de não existir nenhum software de tratamento e análise de dados especificado compatível com este modelo de estação meteorológica, existe a possibilidade de adquirir o *software Visual Weather* da *Campbell Scientific* compatível com outros modelos – ET107, ET106, Toro T107, ou estações montadas especificamente para o utilizador da *Campbell Scientific*.

Este programa permite o controlo e configuração de mais do que uma estação ao mesmo tempo, permite o armazenamento de dados, a criação de gráficos em tempo-real, relatórios estatísticos diários, semanais ou mensais, a criação de gráficos personalizados como rosas-dos-ventos, e o cálculo de algumas variáveis relativas à meteorologia, como a evapotranspiração (Figuras 4.22 e 4.23).

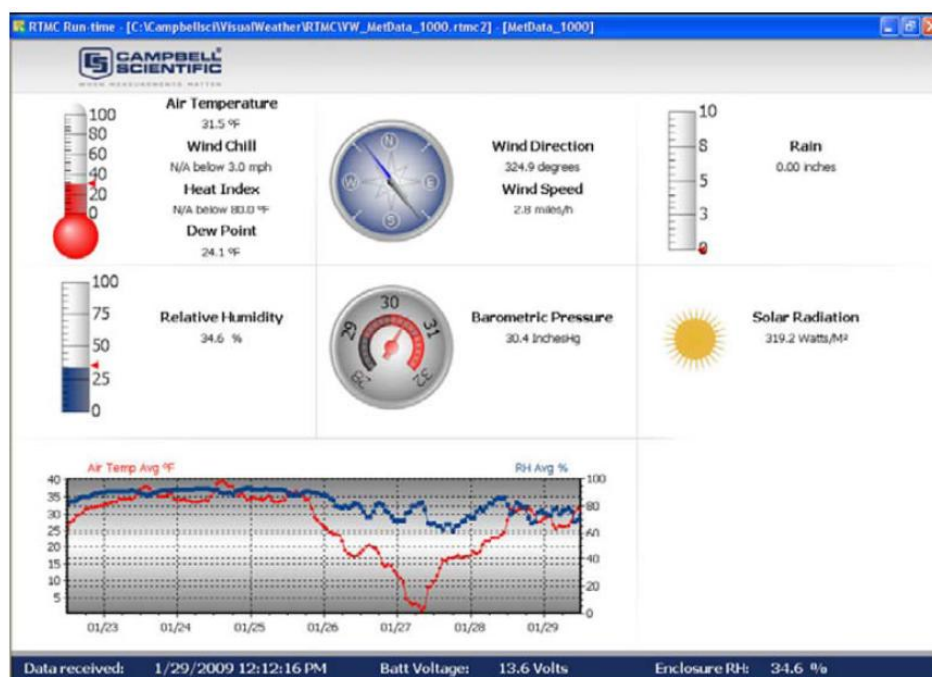


Figura 4.22 – Interface do programa *Visual Weather* [39]

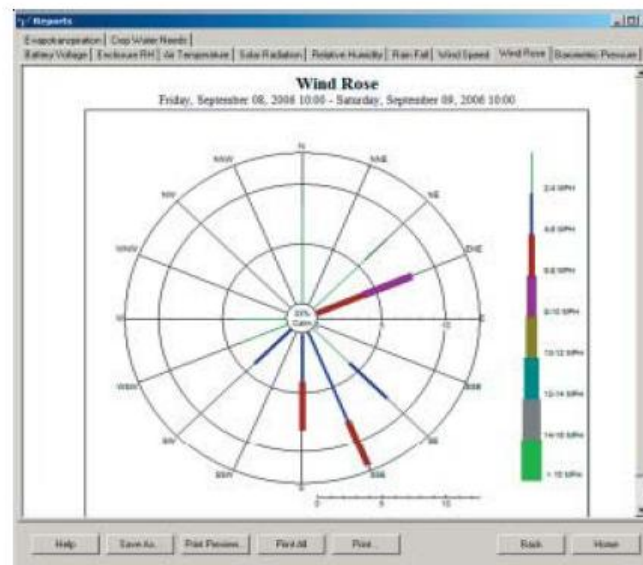


Figura 4.23 – Rosa-dos-ventos desenhada pelo programa *Visual Weather* [39]

4.5.2 Sistemas de Monitorização e Correlação não comerciais

Os sistemas descritos na secção anterior apenas possuem a capacidade de monitorizar dados referentes a condições meteorológicas. Existem vários sistemas não comerciais propostos que visam, para além da monitorização das condições meteorológicas, uma correlação com a produção energética de sistemas de energias renováveis. Alguns destes sistemas serão analisados em seguida.

O primeiro sistema analisado propõe a implementação de um sistema de aquisição de dados para monitorização da eficiência de painéis fotovoltaicos [21]. Desta forma, foi implementado um sistema estruturado em torno de um microprocessador que permite a gestão e controlo de diferentes sensores. Este sistema permite a aquisição de dados referentes à radiação solar através de um piranómetro, à temperatura através de um termistor, e à corrente e tensão eléctricas de painéis fotovoltaicos. Os dados são processados e organizados em memória e posteriormente são transferidos para um computador. Existe a possibilidade da ligação deste sistema através da rede possibilitando a fácil transferência de dados entre este e o computador. Apesar da fácil transferência de informação, este sistema não inclui nenhuma interface gráfica com o utilizador. A grande complexidade envolvida a nível de hardware e software pode ser considerada uma desvantagem. A abordagem usada neste sistema não é flexível a mudanças, tornando-se difícil a sua adaptação a qualquer conjunto de painéis fotovoltaicos, ou a outro tipo de sensores.

Um outro sistema foi desenvolvido com o objectivo de monitorizar painéis fotovoltaicos [22]. No artigo científico referenciado é descrito um sistema capaz de adquirir dados sobre as variáveis ambientais, tais como, temperatura ambiente, radiação solar, e variáveis medidas dos painéis fotovoltaicos, tais como tensão e corrente eléctricas. O equipamento é desenvolvido usando um controlador da *National Instruments*® (*FieldPoint - modular distributed I/O*) que interliga vários sensores. Para este sistema foi desenvolvida uma aplicação baseada no programa LabVIEW®, para processamento, visualização e gravação dos dados adquiridos. O uso deste programa permite uma visualização de dados instantâneos das condições meteorológicas, curvas I-V, P-V dos painéis fotovoltaicos, e alguns parâmetros eléctricos de saída, tal como Factor de Forma, rendimentos e potência máxima (Secção 3.2).

O próximo sistema analisado aproxima-se mais do trabalho desenvolvido na presente Dissertação na medida que correlaciona as condições meteorológicas com a produção energética de painéis fotovoltaicos e de um gerador eólico [23]. Neste artigo científico, à semelhança dos anteriores, é proposto um sistema de aquisição de dados com vários sensores associados, para medição das condições meteorológicas e de parâmetros eléctricos dos sistemas de energias renováveis. Os sinais dos sensores são filtrados e amplificados através de circuitos eléctricos de precisão e adquiridos por uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*® modelo *PCI-6024E* que fará uma interface com um computador pessoal. Posteriormente e através de uma interface gráfica desenvolvida com o programa LabVIEW®, os dados adquiridos são depois processados, visualizados e gravados na memória do computador. O sistema desenvolvido foi apenas testado com um sistema de energia renovável piloto de baixa potência, com dois conjuntos de painéis fotovoltaicos de 300 e 450 W, e um gerador eólico de 2kW. A interface gráfica apresentada e o tipo de correlação é um pouco limitada, tal como os dados apresentados apenas de um dia de dados adquiridos.

Os três sistemas analisados apresentam algumas desvantagens em relação ao sistema proposto nesta Dissertação. Um dos pontos negativos é sem dúvida a complexidade em termos de concepção de sistema, isto porque, todos propõem a implementação de raiz, a nível de *hardware*, de um sistema de aquisição de dados que interligue vários sensores e consiga comunicar com um computador. A pouca flexibilidade de ajuste destas abordagens a um qualquer sistema de energia renovável torna-os pouco interessantes a nível comercial. Apesar da precisa aquisição e rigoroso armazenamento de dados, os sistemas analisados pecam bastante na interface gráfica disponível para o utilizador. O programa LabVIEW®, utilizado em dois dos sistemas, é normalmente usado como programa de controlo não sendo tão forte

em termos de cálculo matemático, tratamento e processamento de dados e gráficos conseguidos. A pouca flexibilidade em termos da escolha de variáveis a correlacionar e inexistente tratamento dos gráficos é um ponto negativo. O sistema proposto nesta Dissertação vem colmatar muitas das falhas detectadas nos sistemas analisados.

Capítulo 5

Sistema Desenvolvido

Neste capítulo será apresentado o trabalho desenvolvido. Inicialmente será descrito o modelo conceptual do sistema pretendido que está na base do resultado final implementado. Muitas das imagens referentes a representações gráficas e procedimentos específicos da aplicação presentes neste capítulo, serão apresentadas na língua inglesa, pois a aplicação desenvolvida utiliza uma sintaxe semelhante.

5.1 Modelo conceptual do Sistema

O objectivo principal do sistema centrou-se na integração de duas áreas de interesse, a recolha de dados meteorológicos e a geração de energia eléctrica proveniente de sistemas de produção renovável. A Figura 5.1 mostra o modelo conceptual para a integração destas áreas com o utilizador.

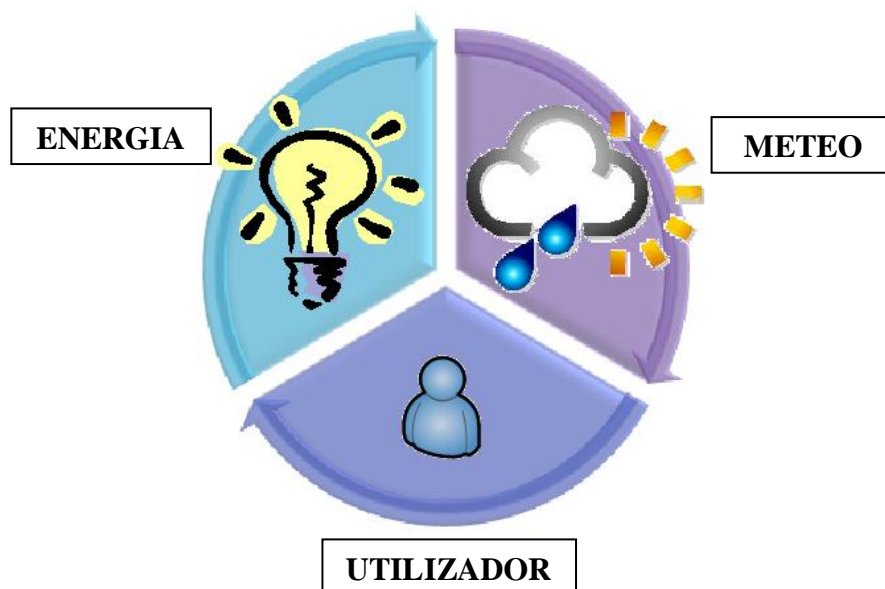


Figura 5.1 – Modelo Conceptual do sistema desenvolvido

A ligação entre estas áreas de interesse representa o ponto de partida para o desenvolvimento de um sistema ambicioso desenvolvido nesta Dissertação. A partir do modelo conceptual, foi possível descer um nível de abstracção no sistema. O sistema foi

pensado ao nível do equipamento disponível e necessário para atingir os objectivos propostos. A Figura 5.2 pode ser vista como um modelo técnico de implementação do modelo conceptual do sistema proposto.

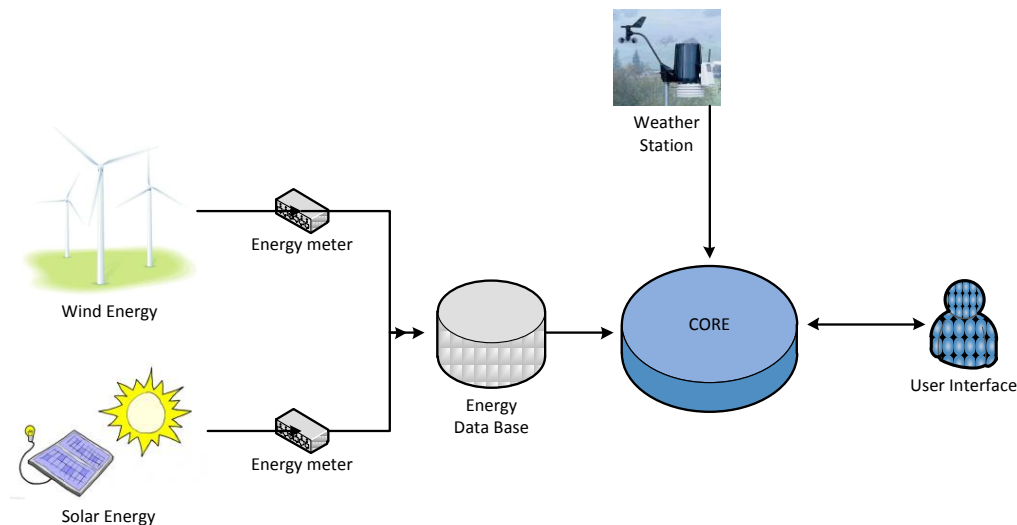


Figura 5.2 – Integração de sistemas em detalhe

A Figura 5.2 resulta da junção de vários blocos importantes. O bloco “CORE” como bloco central de integração, interliga a base de dados de energia com a estação meteorológica e com o utilizador. A base de dados de energia contém dados adquiridos diariamente provenientes de contadores de energia ligados a dois sistemas de energias renováveis, eólica e solar. O bloco “CORE” é o núcleo do sistema, responsável pela aquisição de dados meteorológicos. Para além disso, correlaciona os dados adquiridos da estação meteorológica com os dados de energia adquiridos da base de dados. É também pretendido uma interface com o utilizador que permita a parametrização da estação meteorológica e visualização dos dados.

Definido o modelo conceptual do sistema, será descrito nas próximas secções a implementação prática de todos estes blocos.

5.2 Sistemas de Produção de Energia a partir de fontes Renováveis

Neste subcapítulo serão descritos os sistemas de produção de energia a partir de fontes renováveis utilizados nesta Dissertação e a aquisição dos dados para a base de dados de energia. Na secção 5.2.1 será apresentado o sistema de energia eólica e na secção 5.2.2 o

sistema de energia solar. A Figura 5.3 destaca que fracção do sistema global proposto será detalhada nesta secção.

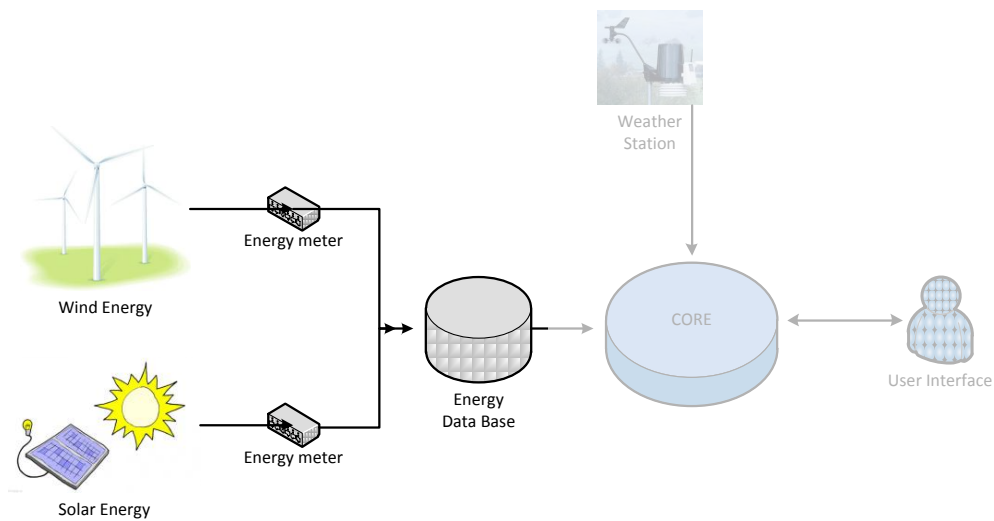


Figura 5.3 – Sistemas de Produção de Energia a partir de fontes Renováveis

5.2.1 Gerador eólico de pequena potência

O gerador eólico encontra-se instalado no terraço do Departamento de Engenharia Electrotécnica (DEE) e é constituído por um gerador de pequena potência da empresa “Yangzhou Shenzhou Wind-Driven Generator Co., Ltd”, modelo “FD3.6-2000-10L” (Figura 5.4).



Figura 5.4 – Gerador eólico de baixa potência instalado no Departamento de Engenharia Electrotécnica

O gerador de baixa potência instalado no DEE apresenta as seguintes especificações, segundo o fabricante:

Tabela 5.1 – Especificações do gerador eólico (Fonte: Manual do equipamento)

Parâmetro	Valor
Potência nominal (W)	2000
Tensão nominal (V)	120
Diâmetro das pás do rotor (m)	3,2
Velocidade do vento de arranque (m/s)	3,2
Velocidade de vento nominal (m/s)	9
Velocidade de vento de segurança (m/s)	16
Rotação das pás nominal (rpm)	400
Gerador	Alternador de Magnetos Permanentes
Material das pás	Fibra de vidro
Número de pás	3

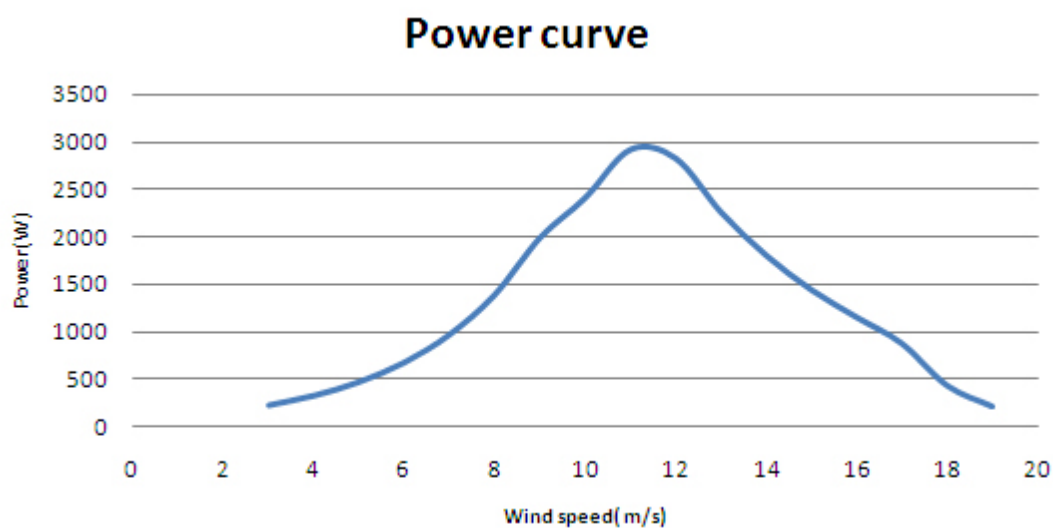


Figura 5.5 – Potência gerada em função da velocidade do vento, segundo o fabricante (Fonte: Manual do equipamento)

O gerador eólico é ligado a um rectificador/inversor, que por sua vez é ligado à rede do edifício.

5.2.2 Painéis fotovoltaicos (PV)

Existem sete módulos de painéis fotovoltaicos instalados no terraço do Departamento de Engenharia Electrotécnica, cinco painéis de silício amorfo (a-Si), e dois painéis de silício multi-cristalino.



Figura 5.6 – Painéis fotovoltaicos instalados no Departamento de Engenharia Electrotécnica

O conjunto de cinco painéis são da empresa “Bangkok Solar”, modelo BS 40, e os restantes da empresa “SWEA”, modelo SWL 130. Estes modelos foram ensaiados pelos seus fabricantes nas condições STC (Ver Capítulo 3), para uma radiação solar de 1000 W/m^2 e uma temperatura de célula de 25°C . Os valores determinados para cada tipo de módulo encontram-se na seguinte tabela.

Tabela 5.2 – Especificações dos painéis fotovoltaicos (em condições STC)

	Bangkok Solar – BS 40 (Silício Amorfo (a-Si))	SWEA – SWL 130 (Silício Poli-cristalino)
Potência pico $P_{m\acute{a}x}$ (W)	40	130
Tensão operacional $V_{m\acute{a}x}$ (V)	44,8	40,8
Corrente à tensão operacional $I_{m\acute{a}x}$ (A)	0,93	3,2
Tensão de circuito aberto V_{OC} (V)	62,2	50,1
Corrente de curto-circuito I_{sc} (A)	1,14	3,21
Área total (m^2)	$0,635 * 1,245 \approx 0,8$	$1,2 * 0,99 \approx 1,2$

Estes painéis encontram-se associados em três conjuntos, perfazendo um total de 460 W de potência nominal:

- Dois painéis Bangkok Solar – BS 40 em paralelo (80 W);
- Três painéis Bangkok Solar – BS 40 em paralelo (120W);
- Dois painéis SWEA – SWL 130 em paralelo (260W).

Cada um destes conjuntos é ligado a um inversor SWEA UWT-I-250, que por sua vez são ligados em paralelo e finalmente ligados à rede do edifício.

5.2.3 Aquisição de dados de Energia e Base de dados

Para a aquisição de dados, foram utilizados dois contadores de energia, ambos da marca *Algodue Elettronica*, modelo *UPT210*. Cada um foi ligado a um dos sistemas de geração descritos anteriormente. Estes contadores são ligados depois dos rectificadores/inversores, para que os parâmetros lidos digam respeito aos parâmetros de energia entregue à rede.



Figura 5.7 – Contadores de energia UPT210 instalados no DEE

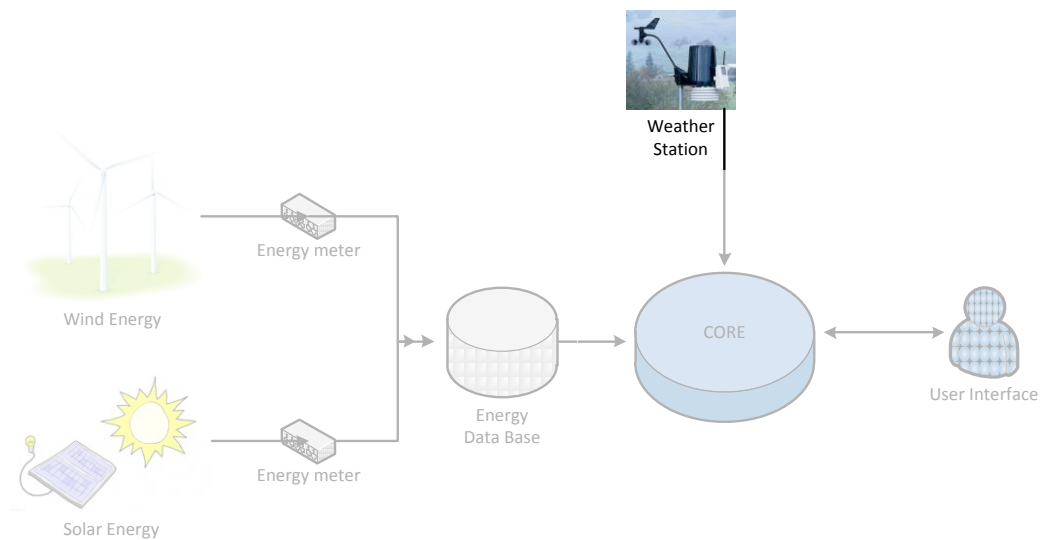
Os contadores de energia encontram-se ligados à rede local, o que possibilita a aquisição de dados de geração dos dois sistemas através de um computador armazenando-os numa base de dados [8]. Desta forma é possível adquirir dados continuamente, onde o sistema grava um ficheiro diário no formato MS Excel ao fim do dia, por cada sistema de geração. Os parâmetros eléctricos da produção de energia associados a cada um dos sistemas existentes são apresentadas na Tabela 5.3. Estes dados irão permitir que a aplicação desenvolvida apresente vários gráficos, correlacionando diferentes parâmetros, quer energéticos quer meteorológicos.

Tabela 5.3 – Dados de geração disponíveis dos sistemas de energias renováveis

Dados do gerador eólico/células fotovoltaicas
Voltage (V) – Tensão eléctrica
Current (A) – Corrente eléctrica
Power (W) – Potência eléctrica
Power Factor – Factor de potência
Reactive Power (VAr) – Potência Reactiva
Active Power (VA) – Potência Activa

5.3 Estação Meteorológica

De forma a implementar o modelo conceptual do sistema considerou-se uma estação meteorológica com a capacidade de aquisição e armazenamento das grandezas necessárias à correlação.

**Figura 5.8** – Estação Meteorológica

A estação meteorológica é capaz de adquirir dados meteorológicos informativos sobre os elementos que mais influenciam e condicionam a produção de energia eléctrica por parte dos sistemas de geração, ou seja o vento, radiação solar e temperatura. As principais características são:

- Permitir a ligação dos sensores pretendidos, nomeadamente um anemómetro, piranómetro e termómetro (Capítulo 4);

- Possuir um *datalogger* (Capítulo 4) capaz de gravar dados continuamente, com tempo de amostragem mínimo de um minuto;
- Possibilitar a comunicação com o *datalogger* através de um computador pessoal, através de uma ligação USB/RS-323,
- Através do computador pessoal, permitir a medição em tempo real dos valores instantâneos dos sensores, tal como a aquisição dos dados gravados em memória do *datalogger*.

Optou-se por um sistema que reunisse as características necessárias. Este sistema é constituído pelo *datalogger* Em50 da *Decagon Devices* e por três sensores compatíveis:

- O sensor de temperatura ou termómetro ECT;
- O sensor radiação solar ou piranómetro PYR;
- O anemómetro Davis Cup.

Para além do equipamento físico, na compra do *datalogger* Em50, foi fornecido um *software* gratuito para configuração e tratamento de dados (*ECH2O Utility*). Para a análise e monitorização de dados meteorológicos, a compra de outro *software* teria de ser feita (*DataTrac*).

5.3.1 Datalogger Em50

O *datalogger* Em50 é um dispositivo que possui uma memória não volátil capaz de armazenar dados de 5 sensores diferentes. O *datalogger* possui ligação para 5 sensores diferentes, sendo a comunicação com um computador pessoal feita através de um cabo *stereo-USB*. O *datalogger* requer uma alimentação de 5 baterias AA. Este é protegido por um invólucro/caixa preparado para ser usado no exterior, resistente ao mau tempo, ao impacto e aos raios UV (Figura 5.9).

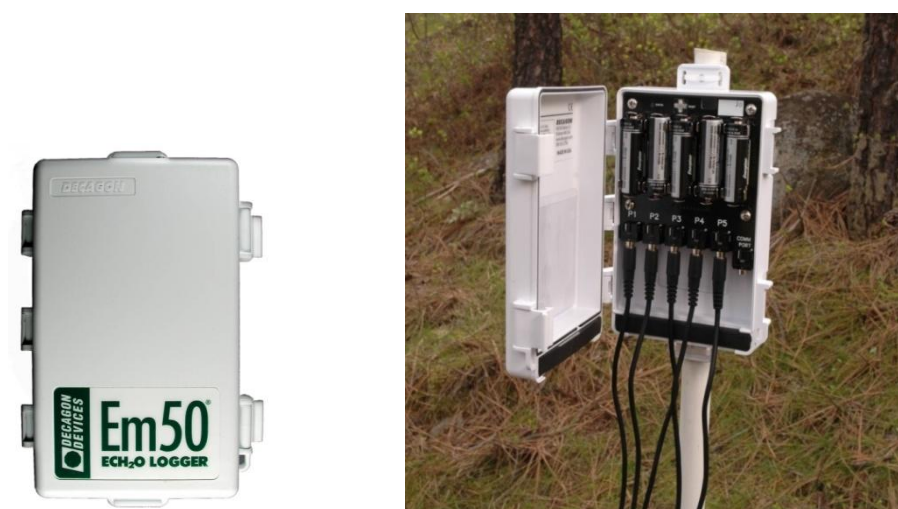


Figura 5.9 – Datalogger Em50

(Fonte: www.decagon.com)

Em termos de memória, é possível configurar o *datalogger* Em50 para que sejam armazenados os dados dos sensores num determinado intervalo de medição, ou seja, é controlado de quanto em quanto tempo os dados são gravados na memória interna. O intervalo de medição funciona relativamente ao relógio interno do Em50 e o seu valor mínimo é de 1 minuto, sendo que o *datalogger* poderá também ser configurado para intervalos de tempo maiores. Embora não especificado nos manuais fornecidos ao público, em versões mais recentes de firmware¹¹ do *datalogger*, é possível configurar o intervalo de medição para 10 segundos. Esta informação foi fornecida contactando directamente o fabricante. É também importante salientar que não é possível gravar dados com intervalos de medição diferentes para cada sensor.

Independentemente do intervalo de medição, o *datalogger* Em50 faz uma leitura a cada 60 segundos. Desta forma, quando o relógio interno chega ao intervalo escolhido pelo utilizador, o Em50 guarda em memória uma média de todas as leituras feitas de 60 em 60 segundos desde a última vez que foram gravados dados. Se o intervalo de medição for de 60 minutos, o *datalogger* guardará a cada hora uma média das últimas 60 leituras feitas em cada minuto [24].

Todos os valores lidos pelo Em50 em milivolt são convertidos para um formato *raw* e guardados na memória interna. Estas leituras em formato *raw* são armazenadas como “*unsigned integers*” (inteiros sem sinal) de 16-bit ou 32-bit. Para sensores analógicos, este valor *raw* representa a conversão de analógico para digital. Um sensor digital comunica

¹¹ **Firmware** é o conjunto de instruções operacionais programadas directamente no hardware de um equipamento electrónico.

directamente em série com o Em50 para a transferência de dados. Após a leitura da memória do *datalogger*, os dados em formato *raw* são convertidos para as respectivas unidades consoante o sensor (secção 5.4.2.1). A memória interna tem a capacidade de armazenar 36864 leituras, sendo que cada leitura corresponde a um conjunto de valores dos portos. Se existir algum porto desligado, isto é sem sensor, será guardado em memória um valor igual a zero (0) para o correspondente porto. Para a aplicação desenvolvida serão usados apenas três sensores e consequentemente 3 portos. Como o *datalogger* possui 5 portos, em 2 portos o valor guardado em formato *raw* será sempre zero (0).

Como o Em50 tem a capacidade de armazenar 36864 leituras, o seu valor será atingido num tempo que varia com o intervalo de medição escolhido pelo utilizador. Quando o valor máximo de leituras é atingido, os valores de leituras mais antigos são substituídos pelos novos valores. A tabela seguinte mostra o tempo de duração até a memória atingir a capacidade máxima relativamente ao intervalo de medição escolhido.

Tabela 5.4 – Duração da memória do datalogger Em50

Intervalo de medição	Leituras por dia	Tempo até a memória atingir a sua capacidade máxima
10 segundos	8640	4 dias, 6 horas e 24 minutos
1 minuto	1440	25 dias, 14 horas e 24 minutos
5 minutos	288	128 dias (aprox. 4 meses)
10 minutos	144	256 dias (aprox. 8 meses)
1 hora	24	1536 dias (aprox. 4 anos)

Para além da memória interna do *datalogger* Em50 é possível ler os valores instantâneos dos sensores em tempo real no formato *raw*. Para tal, é necessário o envio de um comando específico através da porta série para que o *datalogger* retorne os valores instantâneos de todos os sensores (Anexos). É também possível configurar o datalogger para, sempre que gravar dados em memória, estes sejam enviados através da porta série. A seguinte tabela faz um breve resumo sobre as características mais importantes do *datalogger* em questão.

Tabela 5.5 – Especificações do datalogger Em50 [24]

Especificações	
Portos de entrada	5, 12-bit analógicos ou 32-bit digital
Tipo de porto	Conector P2 estéreo 3.5 mm (TRS conector)
Fonte de alimentação	5 baterias AA alcalinas ou de lítio
Invólucro	Resistente ao tempo adverso, impacto e aos raios UV (IP 55 ¹² , NEMA 3R ¹³)
Condições de operação	De 60° -40°C (com uma humidade relativa de 100%)
Comunicação	Conector P2 estéreo com porta série dedicada, para uso com o adaptador USB da Decagon
Capacidade de memória	1 MB (36864 leituras para todos os portos)
Tipo de memória	Flash do tipo não volátil

Em termos de comunicação com o *datalogger* Em50 para aquisição de dados e configuração foi necessária uma compreensão aprofundada do tipo de comunicação existente entre o hardware e o software da Decagon. O manual fornecido pela Decagon é dirigido para um tipo de cliente que usaria o software fornecido para operar o *datalogger*, sendo bastante superficial em termos das especificações de comunicação, comandos aceites, formato e tipo de mensagens retornadas pelo *datalogger*. O software ECH2O Utility possui um terminal que permite visualizar todos os comandos de controlo enviados para o *datalogger*, e as mensagens retornadas. Foi necessário contactar o próprio fornecedor do equipamento, para realizar a comunicação com o Em50.

O *datalogger* Em50 permite uma ligação através da porta série, a um computador pessoal. Uma comunicação série é o protocolo de baixo nível mais comum para comunicação entre dois ou mais dispositivos. Uma porta série envia e recebe *bytes* de informação, um *bit* de cada vez. Estes *bytes* são transmitidos em formato binário (numérico) ou de texto. O *datalogger* Em50 usa um protocolo de comandos baseados em texto (*text-based command protocol*). O Em50 responde a simples comandos de texto ASCII¹⁴ através da porta série;

12 O Código IP ou classificação internacional de protecção, classifica o grau de protecção contra a intrusão de objectos sólidos, poeira, contacto accidental ou água em invólucros que contenham algum tipo de sistema eléctrico

13 Do inglês *National Electrical Manufacturers Association*. Á semelhança do código IP, esta associação também classifica os invólucros quanto à sua protecção.

14 ASCII significa American Standard Code for Information Interchange. Os computadores apenas compreendem números, portanto, um código ASCII é a representação numérica de um carácter, como 'a' ou '@' ou uma acção de algum tipo (Fonte www.asciitable.com).

estes comandos permitem escolher vários parâmetros de configuração, aceder a valores dos sensores, e descarregar os dados armazenados na memória interna.

Os parâmetros de comunicação por omissão (*default communication parameters*) são:

- Velocidade de transmissão de 9600 bits/s. A velocidade de transmissão diz respeito aos bits transferidos por segundo (*bit/s* ou *bps*). Existe também a designação inglesa *baud rate*, que significa o número de símbolos transmitidos para a representação de cada bit por segundo. No caso da comunicação série, para cada bit transmitido é utilizado o símbolo “0” ou “1”, ou seja o número de bits é igual ao *baud rate* (exceptuando alguns modems e outros dispositivos), isto porque, por cada bit transmitido é usado um símbolo
- Um *Start bit*. Este bit assinala o início de cada mensagem enviada.
- Oito *bits* de dados. O número de bits de dados que constituem a mensagem. Estes dados podem ser transferidos como dados binários ou dados no formato *ASCII*. Tipicamente são 7 ou 8 bits de dados.
- Sem *bit* de paridade. Este bit é opcional, e a sua utilização permite a identificação da existência de erros comunicação.
- Um *Stop bit*. Tem como função separar dois caracteres transmitidos consecutivamente.

A Figura 5.10, ilustra o formato das mensagens dos dados numa comunicação série.



Figura 5.10 – Formato das mensagens numa comunicação série

(Fonte: www.mathworks.com)

No caso do formato das mensagens suportado pelo Em50, também é usada a definição “8-N-1”, que significa, um *Start bit*, oito *bits* de dados, sem *bit* de paridade e com um *Stop bit*.

O Em50 também usa o carácter *carriage return* (CR, valor 13 na tabela ASCII) para terminar cada linha. O *carriage return* é usado como um carácter de controlo do código ASCII, e neste caso serve para identificar o final de uma linha de texto, ou seja o final de cada linha de comando enviada. Os comandos de controlo predefinidos aceites pelo *datalogger* serão discutidos no Capítulo 5.4.

5.3.2 Anemómetro Davis Cup

O anemómetro *Davis Cup* é um sensor compatível com o *datalogger* Em50 capaz de medir a direcção e velocidade do vento (Figura 5.11).



Figura 5.11 – Anemómetro *Davis Cup*

(Fonte: www.decagon.com)

Em relação à direcção do vento o *datalogger* Em50 calcula este valor a cada minuto. O valor do potenciómetro ligado ao estabilizador vertical (direcção do vento) e o número de pulsos contados pelos “copos” ou pás rotacionais (magnitude) são usados para calcular a direcção do vento em componentes X e Y. Os componentes X e Y são usados para calcular a direcção do vento “dominante” no intervalo de medição escolhido pelo utilizador. Se não existir vento medido pelas pás rotacionais, o valor lido para a direcção do vento será zero (Norte) apesar da direcção física real do estabilizador vertical [25].

Para a velocidade do vento, o Em50 apenas usará os pulsos medidos pelas pás rotacionais, sempre num intervalo de um minuto. O valor mais elevado será o valor que o *datalogger* assumirá como o valor de rajada de vento (*wind gusts*). A média de todas as contagens feitas a cada minuto será a velocidade média do vento para cada intervalo de medição [25]. O *datalogger* divide estes valores por 6 para ter décimos de pulsos por segundo ou deci-pulsos por segundo.

Para intervalos iguais a um minuto, o valor da rajada de vento e o valor da velocidade média do vento serão sempre iguais, pois o anemómetro guarda o número de vezes que as pás do sensor rodam ao fim de um minuto, calculando assim a velocidade a cada minuto. O mesmo não acontece para intervalos superiores a um minuto. Se o intervalo de medição escolhido for de, por exemplo, dez minutos, a rajada de vento será o maior valor medido nas últimas 10 amostras retiradas em cada minuto, enquanto a velocidade média do vento será a média das últimas 10 amostras retiradas em cada minuto.

É importante referir que o Em50 tem que guardar dados do anemómetro continuamente para que a velocidade do vento seja calculada. O *datalogger* usa o tempo entre cada medição para calcular a velocidade do vento. Isto significa que quando são feitas leituras em tempo real, os valores não serão os mais rigorosos.

Na montagem do anemómetro é necessário a ajuda de uma bússola com os pontos cardeais para que a direcção do vento lida do anemómetro seja a correcta. O anemómetro deverá retornar zero graus (0°) quando o vento se dirigir de Norte para Sul, e cento e oitenta graus (180°) quando o vento se dirigir de Sul para Norte (Capítulo 2).

O alcance e precisão do anemómetro *Davis Cup* foram testados em túneis de vento, e conseguem medir ventos até aproximadamente 67 m/s (150 mph). Segundo o fabricante este anemómetro conseguiu medir ventos de aproximadamente 78 m/s (175 mph) no furacão *Andrew* em 1992 nos E.U.A, antes de a sua torre desabar. Na tabela 5.6 são apresentadas as especificações do fabricante do anemómetro e também de acordo com o funcionamento deste com o *datalogger* [25].

Tabela 5.6 – Especificações do anemómetro *Davis Cup* [25]

Especificações Gerais	
Tipo de Sensor – Velocidade do vento	Copos/pás rotacionais e <i>switch</i> magnético
Tipo de Sensor – Direcção do vento	Estabilizador vertical e potenciómetro
Comprimento do Cabo	12 metros
Alcance	
Velocidade do Vento	0-58 m/s (129 mph, 209 km/h)
Direcção do vento	0°-360°
Precisão	
Velocidade do Vento	+/- 5%
Direcção do vento	+/- 7%
Resolução	
Velocidade do Vento	0,45m/s (1mph, 1,6km/h)
Direcção do vento	1° (0-355°)

5.3.3 Piranómetro PYR Solar Radiation

O piranómetro *PYR* consiste num sensor de célula de silício (*silicon-cell*) e representa o modelo SP-110 da empresa *Apogee Instruments Inc.*, adaptado para ser compatível com o *datalogger* Em50 da Decagon.



Figura 5.12 – Piranómetro PYR (Fonte: www.decagon.com)

Este piranómetro tem a capacidade de medir a densidade de fluxo de energia da radiação solar global (W/m^2) num campo de visão de 180° . Como foi referido no Capítulo 3, 90% da energia proveniente da radiação solar está entre os 300 e 1100 nm no espectro solar. Este modelo é calibrado para estimar toda a energia solar de onda curta (Figura 5.13).

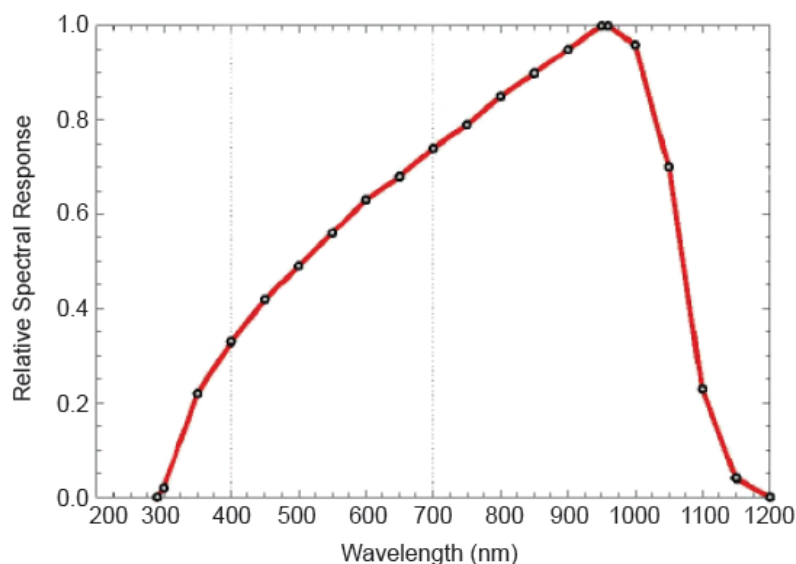


Figura 5.13 – Resposta espectral do Piranómetro Apogee [26]

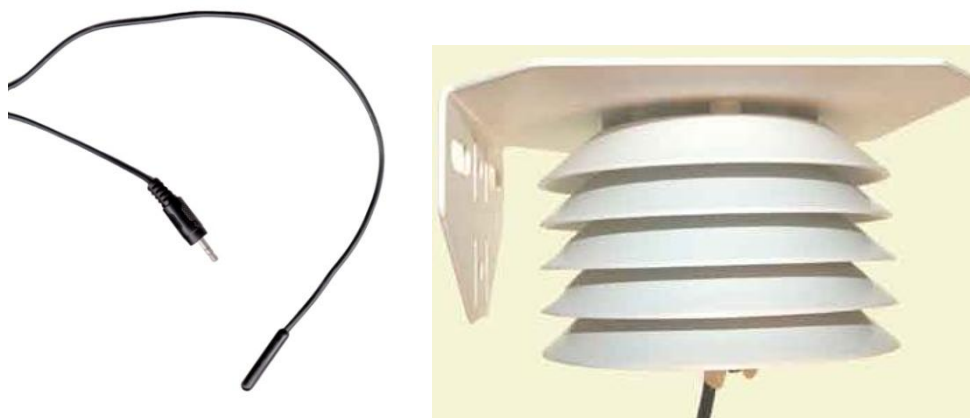
O piranómetro tem uma calibração de exactamente $5 W/m^2$ por mV . Para se obter um valor de radiação solar em W/m^2 a partir de uma tensão eléctrica em milivolt a conversão é feita multiplicando essa tensão por 5. A seguinte tabela contém as especificações do sensor segundo o fabricante.

Tabela 5.7 – Especificações do piranómetro *Apogee* [26].

Precisão	$\pm 5\%$
Alcance	$0 - 1750 \text{ W/m}^2$ ($0 - 350 \text{ mV}$)
Resposta cosseno	<ul style="list-style-type: none"> • Ângulo zénite¹⁵ de 45°: $\pm 1\%$ • Ângulo zénite de 75°: $\pm 5\%$
Condições de operação	<ul style="list-style-type: none"> • De -40°C a 55°C. • De 0 a 100% de humidade relativa. • Concebido para uso no exterior, podendo ser submerso em água.
Cabo	3 metros de cabo de par entrelaçado

5.3.4 Termómetro ECT Temperature

O sensor usado para medir a temperatura do ar foi o *ECT Temperature*, que consiste num termómetro baseado num termístor (Capítulo 4). É aconselhável que quando usado para medições da temperatura do ar, o sensor seja protegido por um escudo de radiação solar, para não receber directamente radiações solares, melhorando a qualidade dos dados medidos (Figura 5.14).

**Figura 5.14** – Sensor de temperatura ECT e escudo de radiação (Fonte: www.decagon.com)

A tabela 5.8 apresenta algumas especificações do termómetro em questão.

¹⁵ O ângulo de zénite é definido como o ângulo entre o raio de incidência do Sol e a normal a um plano horizontal.

Tabela 5.8 – Especificações do termómetro ECT(Fonte: www.decagon.com)

Precisão	<ul style="list-style-type: none"> • De -40 a -20°C: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ • De 5 a 40°C: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ • De 40 a 50°C: melhor que $\pm 1^{\circ}\text{C}$ • De -20 a 5°C: melhor que $\pm 1^{\circ}\text{C}$
Alcance	De -40 a 50°C
Resolução	0.015°C (Para valores iguais e superiores a 0°C) 0.06°C (De -40 a 0°C)
Velocidade de medição	10 ms
Tipo de Sensor	Termístor
Condições de operação	De -40 a 50°C

5.3.5 Montagem do equipamento

Para uma aquisição de dados meteorológicos o sistema descrito anteriormente foi instalado no terraço do Departamento de Engenharia Electrotécnica. Para uma correcta montagem do sistema (por forma a que as medidas sejam o mais correctas possíveis) foi utilizado o seguinte material:

Tabela 5.9 – Material adicional para montagem da Estação Meteorológica

Material	Quantidade
Mastro em aço inoxidável	2
Suportes vários para sensores	2
Abraçadeiras para suportes	3
Abraçadeiras para mastro	2
Pratos para escudo de radiação	5

Foram necessários dois suportes para o sensor de temperatura e o piranómetro. No caso do sensor de temperatura, e como o fabricante aconselhava a aquisição de um escudo de radiação, optou-se pelo fabrico de um. Foi construído um escudo de radiação e colocado o sensor dentro deste, para evitar uma exposição directa do sensor à radiação solar, melhorando

os dados adquiridos da temperatura ambiente. Esse escudo foi implementado através da sobreposição de vários pratos de plástico (Figura 5.15).

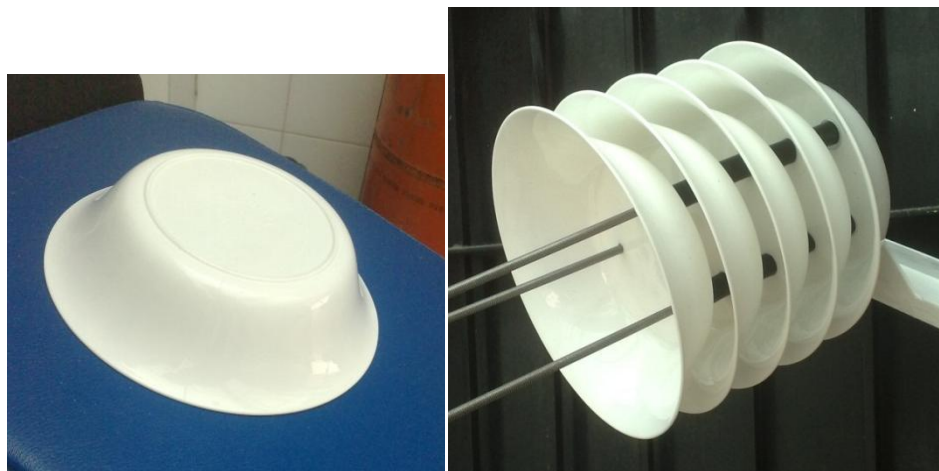


Figura 5.15 – Escudo de radiação construído a partir de vários pratos de plástico.

A montagem do equipamento foi feita no terraço do Departamento de Engenharia Electrotécnica, como mostra a Figura 5.16.



Figura 5.16 – Estação meteorológica instalada no Departamento de Engenharia Electrotécnica.

Legenda: (1) Anemómetro; (2) Piranómetro; (3) Termómetro e escudo de radiação

Na montagem do equipamento existiu a preocupação de colocar o anemómetro num ponto onde estivesse exposto a todas as direcções do vento, sem nenhum obstáculo nas suas imediações. Era também importante que este fosse colocado no ponto mais próximo possível da altura da turbina eólica (aproximadamente a 5,5 metros do solo do terraço), para que os dados do vento medidos se aproximassem do vento disponível para mover a pás do gerador eólico. Consequentemente o anemómetro foi colocado no ponto mais alto do mastro (aproximadamente a 4 metros do solo do terraço), o mais próximo possível da altura do gerador eólico. Optou-se por uma altura máxima de mastro (onde são apoiados todos os sensores) não superior, pelo perigo da sua estabilidade ser comprometida. A estação não foi colocada mais próxima do gerador eólico, pois o movimento das pás poderia modificar a direcção e velocidade do vento medido pelo anemómetro. O anemómetro foi direccionado com o auxílio de uma bússola, para que o suporte apontasse para o ponto cardeal Norte. Os valores do vento medidos pelo anemómetro terão aproximadamente os mesmos valores que os valores de vento disponíveis na turbina eólica. O piranómetro foi colocado de modo a que não existisse a possibilidade de existir sombra sobre o sensor devido ao mastro ou a outro sensor.

5.4 Monitorização e Correlação

O sistema desenvolvido diz respeito ao trabalho central da Dissertação. A análise entre os dados da estação meteorológica e os dados de energia adquiridos mantém-se como um dos objectivos centrais. Para que este objectivo seja conseguido é necessário o desenvolvimento de uma aplicação capaz de fazer esta integração. Na Figura 5.17, o bloco “Core” diz respeito a todo esse trabalho de software desenvolvido, sem esquecer a ligação aos dados de energia (“Energy Data Base”) e à Estação meteorológica (“Weather Station”).

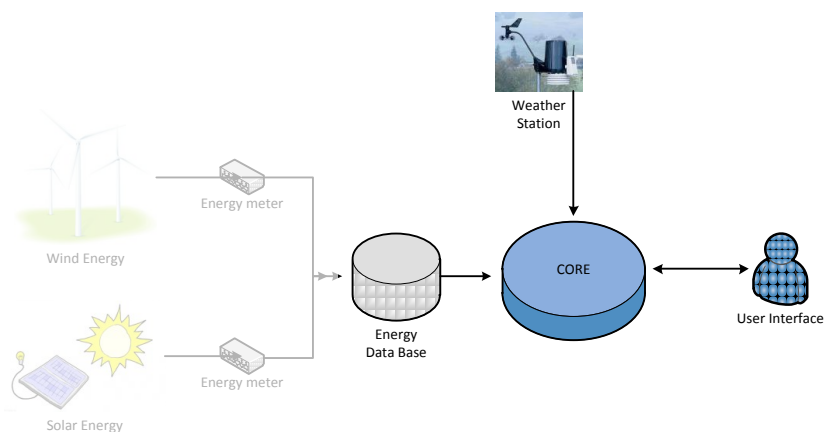


Figura 5.17 – Sistema desenvolvido (CORE) e ligações associadas.

Para uma melhor compreensão do sistema de software implementado, o bloco “Core” pode ser dividido em vários blocos de trabalho (Figura 5.18) desenvolvidos nesta Dissertação:

- Comunicação e Aquisição de dados - Comunicação com a estação meteorológica, para configuração do equipamento e aquisição de dados;
- Processamento de dados – Tratamento e gravação de dados;
- Integração de Dados – Correlação de dados.

Cada um destes blocos será descrito nas próximas secções, desenvolvendo toda a parte que diz respeito à implementação da aplicação de software.

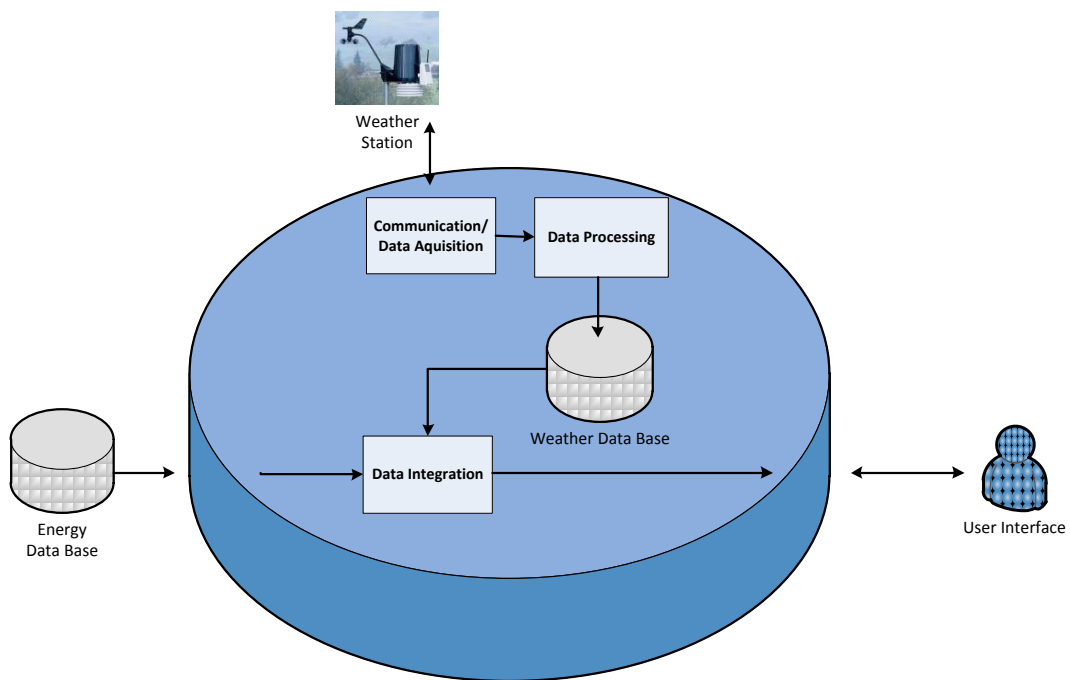


Figura 5.18 – Sistema desenvolvido (CORE) em pormenor

Para além desta estruturação foi necessário um estudo aprofundado do *datalogger* Em50, e do funcionamento do software *ECH2O Utility* que permite a ligação ao *datalogger* a um computador pessoal. Numa fase inicial, depois da ligação dos sensores ao *datalogger* Em50, foi testado o programa gratuito ECH2O Utility, de forma a compreender todo o procedimento de configuração do equipamento. O trabalho desenvolvido visou a

implementação de uma aplicação de raiz personalizada de forma a atingir todos os objectivos propostos. A abordagem foi a de uma implementação de uma aplicação capaz de:

- Conectar-se ao *datalogger* Em50;
- Configurar/Visualizar parâmetros do *datalogger* Em50;
- Adquirir dados instantâneos continuamente dos sensores para visualização em tempo real (não disponível no software *ECH2O Utility*);
- Fazer o carregamento de todos os dados em memória (adquiridos continuamente pelo *datalogger*) para ficheiros diários no formato MS Excel (não disponível no software *ECH2O Utility* – apenas permite o carregamento de dados para um único ficheiro MS Excel);
- Correlacionar os dados adquiridos da estação meteorológica com os do gerador eólico e dos painéis fotovoltaicos. (não disponível no software *ECH2O Utility*).

A aplicação proposta desta dissertação foi desenvolvida com a ferramenta MATLAB®, que representa uma linguagem de computação de alto nível técnico, e permite através de um ambiente interactivo, o desenvolvimento de algoritmos, fácil visualização de dados, análise de dados e cálculo numérico. As razões da escolha deste software de computação foram principalmente a facilidade do tratamento e análise de dados, o estar vocacionada para cálculo matemático, tal como uma abstracção vantajosa em termos de alguns algoritmos implementados e a possibilidade da implementação de uma interface gráfica.

5.4.1 Comunicação e Aquisição de dados

A aplicação desenvolvida teve como ponto de partida o desenvolvimento da comunicação com o equipamento de aquisição, por utilização da porta série USB. Analisando o sistema desenvolvido em mais pormenor, poderão ser definidos vários processos dentro do bloco “Comunicação e Aquisição de dados” (Figura 5.19).

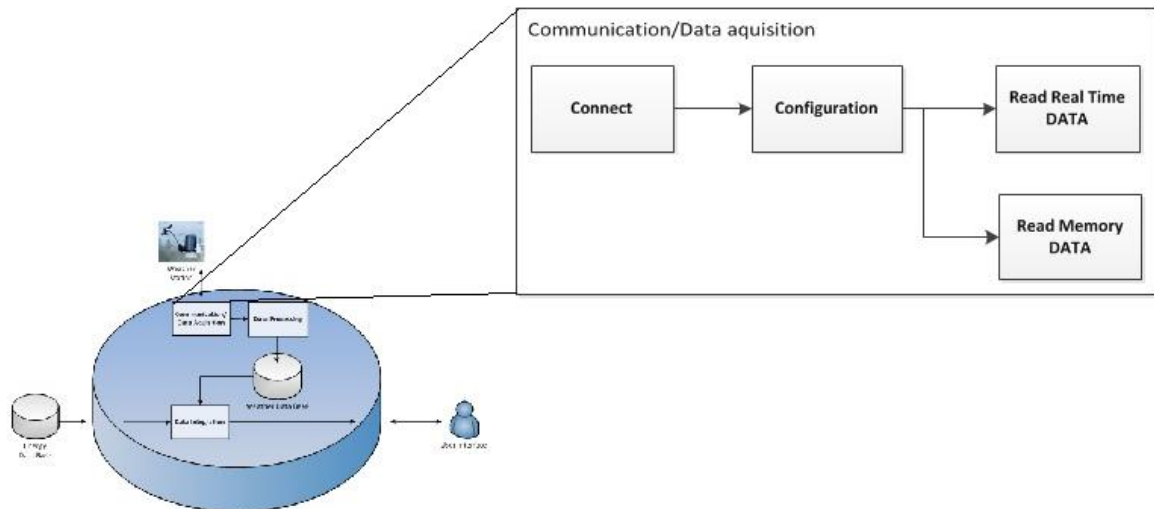


Figura 5.19 – Bloco responsável pela comunicação e aquisição de dados

Cada um destes processos é descrito sucintamente:

- *Connect* – Conexão da aplicação ao *hardware* (Datalogger Em50);
- *Configuration* – Configuração e aquisição dos parâmetros do equipamento (Rotina de escrita/leitura);
- *Read Real Time Data* – Leitura instantânea em tempo real das condições meteorológicas (Rotina de escrita/leitura);
- *Read Memory Data* – Carregamento dos dados em memória das condições meteorológicas (Rotina de escrita/leitura).

A descrição de cada um dos procedimentos será feita nas seguintes secções.

5.4.1.1 *Connect*

Através da ferramenta MATLAB foi criado um objecto série que permite estabelecer uma interface externa com dispositivos ligados à porta série. Foi criado um objecto do tipo *serial* com os parâmetros de comunicação do dispositivo definidos por omissão. Este objecto série, terá um buffer de saída que permite o envio de dados para o equipamento, e um buffer de entrada que permite a leitura de dados enviados pelo equipamento, conforme representado na Figura 5.20.

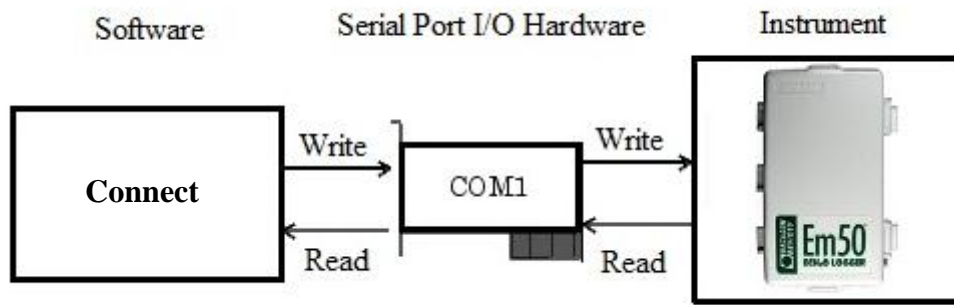


Figura 5.20 – Rotina *Connect* responsável pela ligação entre o computador pessoal e o instrumento (Adaptado de: www.mathworks.com)

Supondo que o equipamento estará ligado à porta série “COM1”, será feita uma ligação entre o software e o *hardware*, através do objecto “serial” (Figura 5.20). É importante referir que para além de definir a porta série a que se encontra ligado o *datalogger*, é necessário definir os vários parâmetros de comunicação (Subcapítulo 5.3) para existir uma ligação bem sucedida. Este procedimento será essencial para todo o programa, porque será através da criação do objecto série que toda a comunicação será feita, para enviar comandos de controlo e receber dados retornados pelo *datalogger* Em50.

Com o objecto “serial” criado, desenvolveu-se um procedimento capaz de enviar comandos de controlo, e ler dados retornados pelo *datalogger* Em50. Esta rotina de nome *Write Read Data* será usada em todos os procedimentos que exijam a escrita e leitura de dados do equipamento, nomeadamente os procedimentos: *Configuration*, *Read Real Time Data* e *Read Memory Data*.

5.4.1.2 *Write Read Data*

O procedimento *Write Read Data* representa uma rotina de escrita e leitura de dados, e está directamente dependente da rotina *Connect*, onde é criado o objecto série. Isto significa que esta rotina não funcionará se antes não for executada a rotina *Connect*, porque o software não estará conectado ao equipamento. É através do objecto série criado em *Connect* que a rotina conseguirá enviar e receber dados. Todos os procedimentos que necessitem de escrever e ler dados usarão esta rotina. A seguinte figura representa graficamente a rotina implementada.

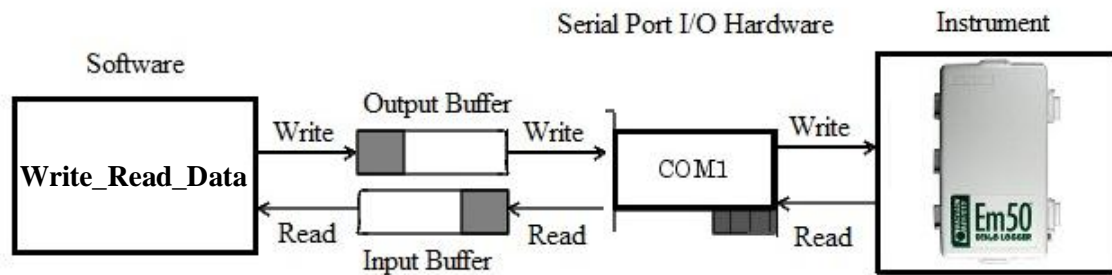


Figura 5.21 – Rotina *Write Read Data* responsável pela escrita e leitura de dados

(Adaptado de: www.mathworks.com)

O procedimento envia comandos de controlo (*Write*), aos quais o *datalogger* responderá (*Read*) sempre que o envio de dados for bem sucedido (Figura 5.21). Estes comandos de controlo enviados permitem a configuração de parâmetros no *datalogger* ou a leitura de dados do equipamento.

Nas tabelas A1, A2 e A3 em Anexos, encontram-se os principais comandos de controlo suportados pelo Em50. Como nota é de referir que nem todos os comandos são suportados por todas versões de *firmware* do equipamento. A versão mais recente suporta todos os comandos mencionados.

5.4.1.3 Configuration

Este procedimento será responsável pela configuração e aquisição de vários parâmetros do equipamento. Devido a representar uma função de escrita e leitura, esta rotina tirará partido da rotina *Write Read Data* para configurar o equipamento. Na verdade este procedimento não representa mais do que várias execuções da rotina de escrita/leitura *Write Read Data* (Figura 5.21).

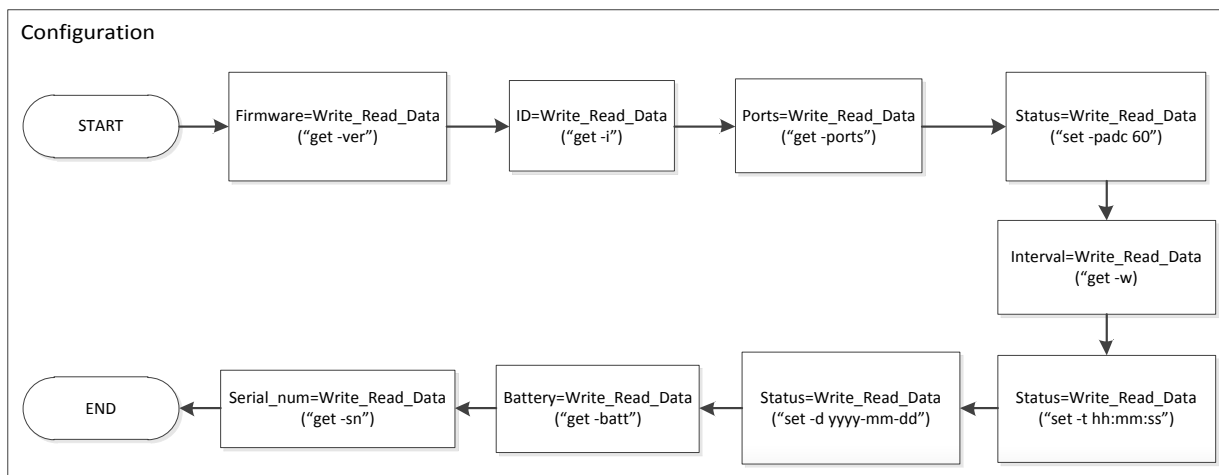


Figura 5.22 – Rotina *Configuration* responsável pela configuração do equipamento

Como se pode observar pela figura, vários comandos de controlo são enviados para receber informações sobre o equipamento, como a versão do firmware do hardware, o estado da bateria, que sensores estão atribuídos a cada porto, entre outras. Vários parâmetros são configurados, como a definição do dia e hora do relógio interno do *datalogger*, assim como o filtro de redução de ruído eléctrico de 50 Hz.

5.4.1.4 Read Memory Data

O datalogger Em50 tem a capacidade de armazenar continuamente várias leituras na sua memória interna durante um intervalo de medição escolhido (Subcapítulo 5.3). O carregamento destes dados será executado através do presente procedimento (Figura 5.23).

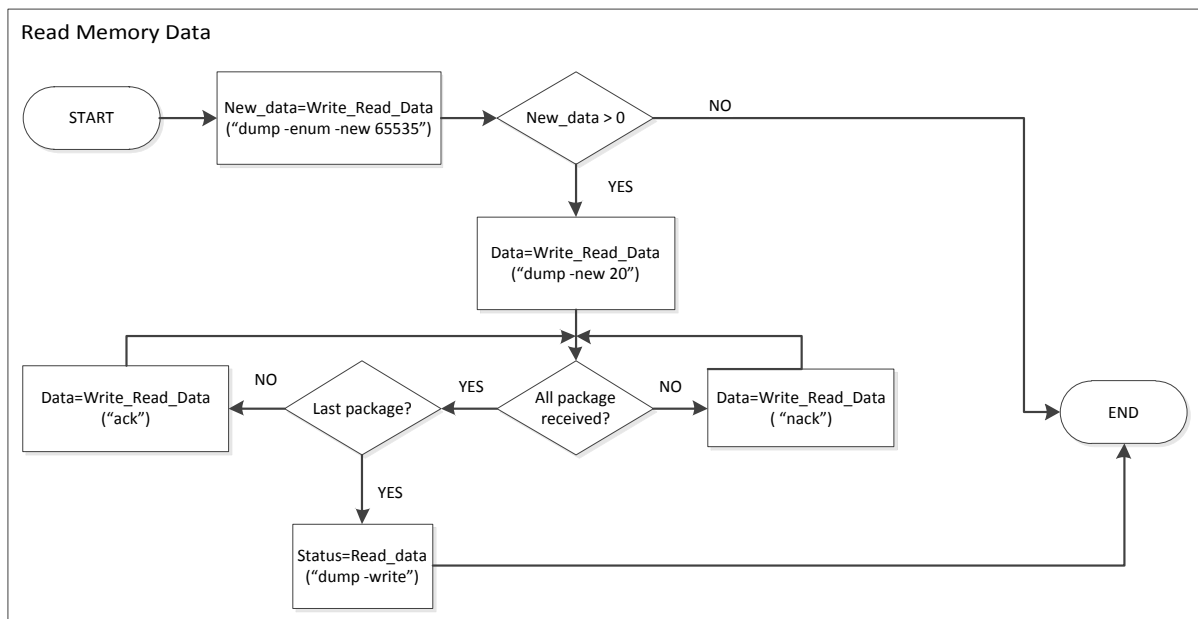


Figura 5.23 – Rotina *Read Memory Data* responsável pelo carregamento de dados da memória do *datalogger Em50*

Através do envio de vários comandos de controlo apenas as leituras novas em memória, isto é, os dados ainda não carregados serão transferidos do dispositivo para o programa de software. Na Figura 5.23 é possível observar o pedido do envio de 20 novas leituras de cada vez. Na recepção das 20 leituras com ou sem sucesso, é enviado o comando ack/nack, até que todos os dados requisitados sejam descarregados (Anexos). O tratamento e posterior gravação destas leituras para uma base de dados serão discutidos mais à frente.

5.4.1.5 *Read Real Time Data*

Uma das funcionalidades importantes do programa desenvolvido será a leitura em tempo real das condições meteorológicas, acedendo directamente aos valores instantâneos retornados pelo *datalogger*. Foi criado um procedimento capaz de requisitar dados, através do envio do comando de controlo *scan* pela rotina de escrita/leitura *Write Read Data* num intervalo de tempo que varia entre os 2 e os 120 segundos. Este termo é representado por *delay* na Figura 5.24.

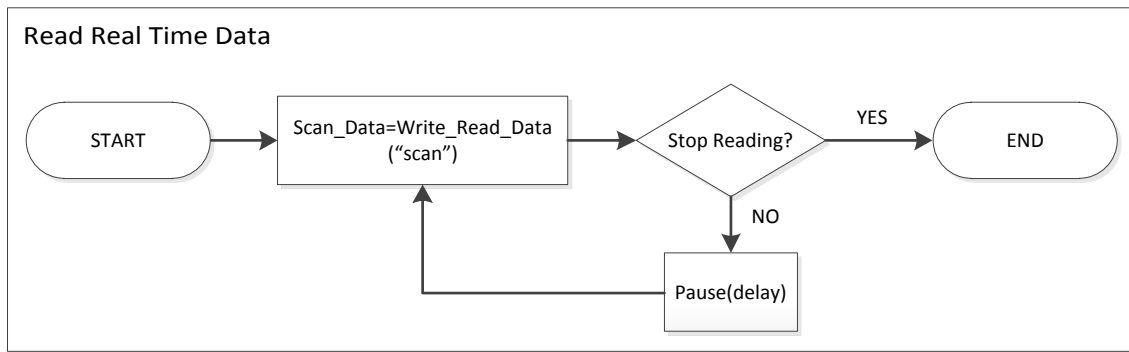


Figura 5.24 – Rotina *Read Real Time Data* responsável pela leitura de dados instantâneos dos sensores ligados ao *datalogger Em50*

5.4.2 Processamento de dados

Recordando o modelo conceptual da Figura 5.18, o bloco *Data Processing* pode ser analisado em pormenor. Este bloco será responsável pelo tratamento dos dados recebidos pelas rotinas anteriormente descritas, nomeadamente através dos procedimentos *Memory Data Processing* e do *Real Time Data Processing*. Em ambos, os dados processados podem ser exportados para ficheiros MS Excel diários, que são guardados numa base de dados interna do computador onde a aplicação é executada.

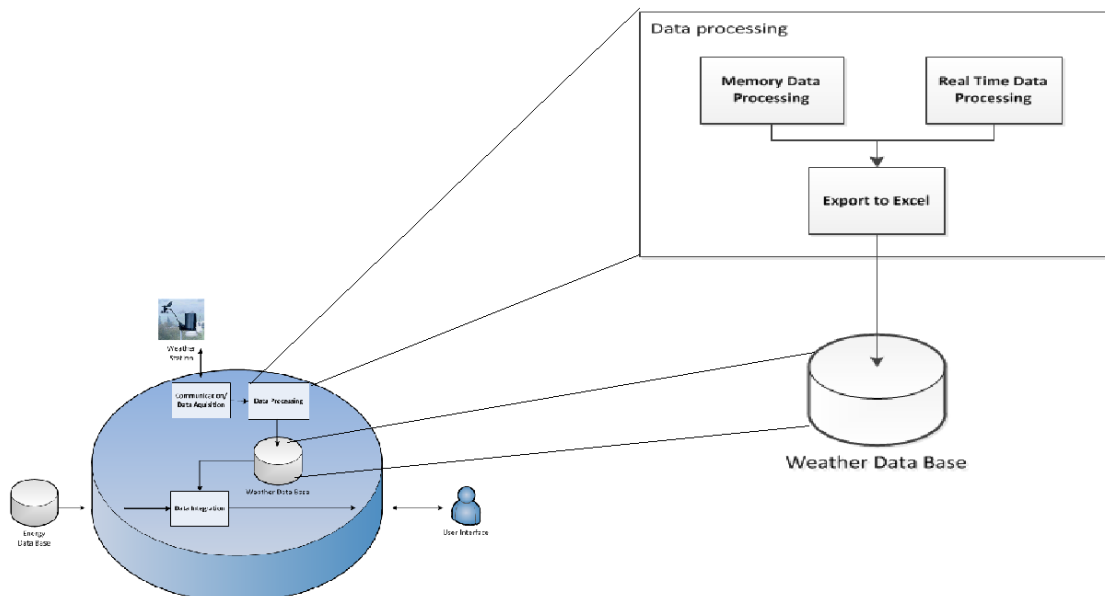


Figura 5.25 – Bloco responsável pelo processamento de dados

5.4.2.1 Memory Data Processing

Os dados adquiridos pelo procedimento *Read Memory Data* são fornecidos em pacotes. No máximo são devolvidas *pack* leituras, como especificado pelo comando de controlo *dump -new [pack]* (Capítulo 8). Cada leitura é retornada em formato de texto contendo a data e hora de aquisição da leitura, e os valores de cada porto no formato *raw* separados por vírgulas, terminando com o carácter CR (*carriage return*), como mostrado em seguida:

DateTime,raw1,raw2,raw3,raw4,raw5\r

Para o campo *DateTime*, o valor retorna um valor de 32 bits, contendo o número de segundos passados desde 1 Janeiro de 2000 00:00. O número de segundos foi convertido através da função *time_raw2time* para o formato de data e hora. No caso da data temos o formato "aaaammdd", onde 'aaaa' é o ano 'mm' é o mês e 'dd' é o dia; enquanto que a hora tem o formato hh:mm:ss, onde hh é a hora, mm são os minutos e ss os segundos.

Cada valor *raw* diz respeito ao valor de cada sensor ligado a um determinado porto. No nosso caso teremos três sensores associados a três portos. O formato de cada valor *raw* retornado e sua conversão, para cada sensor será:

Tabela 5.10 – Informação sobre o Piranómetro

Piranómetro PYR Solar Radiation	
Porto associado	1
Valor raw associado	Raw1
Formato raw	Número inteiro
Mínimo valor raw	0
Máximo valor raw	956
Conversão para Watts por metro quadrado (W/m^2)	$PYR = Raw \cdot (1500/4096) \cdot 5$

Tabela 5.11 – Informação sobre o anemómetro

Anemómetro Davis Cup	
Porto associado	3
Valor raw associado	Raw3
Formato raw	<p>Valor de 32 bits (0 e 1).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bit 0 (LSB-menos significativo)– Detecção de sensor: 1 sensor detectado, 0 sensor não detectado; • Bits 1-9 – Direcção do vento; • Bits 10-29 – Rajadas de vento em deci-pulsos por segundo; • Bits 20-29 – Velocidade média do vento em deci-pulsos por segundo. <p>Nota: Cada conjunto de bits terá de ser convertido de binário para decimal.</p>
Conversão de deci-pulsos para metros por segundo (m/s)	$WIND = \frac{1.006 * (deci - pulses)}{10}$

Tabela 5.12 – Informação sobre o termómetro

Termómetro ECT Temperature	
Porto associado	2
Valor raw associado	Raw2
Formato raw	Número inteiro
Mínimo valor raw	5
Máximo valor raw	4090
Conversão para graus centígrados (°C)	<p>Transformada logaritmica (logaritmo natural):</p> $x = \ln \left(\frac{4095}{Raw} - 1 \right)$ <p>Polinomial de 3ª ordem: $ECT = 25,01914 + x * (-22,8437 + x * (1,532076 + (-0,08372 * x)))$</p>

Após a conversão, os dados são exportados para ficheiros MS Excel, através do procedimento *Export to Excel* explicado mais à frente.

5.4.2.2 Real Time Data Processing

No procedimento *Real Time Data Processing* o formato das mensagens das leituras recebidas é semelhante ao retornado em “Memory Data Processing”, mas sem o campo “DateTime” e a separação entre valores lidos dos portos é feita com dois espaços em branco:

```
raw1 raw2 raw3 raw4 raw5\r
```

Cada um dos valores é convertido da mesma forma que no procedimento anterior. O propósito destes valores é a apresentação em tempo real das condições meteorológicas. Neste procedimento existe a possibilidade de gravação de dados em tempo real para ficheiros MS Excel através do procedimento *Export to Excel*, tal como no procedimento anterior. Este procedimento deve ser usado como uma aquisição pontual de dados num intervalo de medição mais pequeno, e não como uma alternativa à gravação de dados na memória interna do *datalogger*.

5.4.2.3 Export to Excel e Weather Data Base

Após a conversão dos dados das leituras, a função *Export to Excel* faz uma exportação destas leituras para ficheiros diários MS Excel consoante o campo *DateTime* convertido. O resultado será a criação de vários ficheiros diários MS Excel nomeados com a data do dia das leituras (“aaaammdd.xls”) contendo informação sobre as condições meteorológicas, no formato:

Tabela 5.13 – Formato dos ficheiros MS Excel criados.

	A	B	C	D	E	F
2	Measurement Time	Wind Direction	Wind Gusts	Avg Wind Speed	Temperature	Solar Radiation
3	(HH:MM:SS)	(°)	(m/s)	(m/s)	(°C)	(W/m ²)
4	00:00:00	0	2,1126	2,1126	20,19	0
5	00:01:00	348	2,515	2,515	20,19	0
6	00:02:00	0	2,515	2,515	20,24	0
...
1024	17:00:00	248	2,012	2,012	34,93	646,36
1025	17:01:00	286	1,9114	1,9114	35,18	642,7
1026	17:02:00	308	1,3078	1,3078	35,33	640,87
1027	17:03:00	291	1,6096	1,6096	35,3	639,04
...

O formato e nome dos ficheiros criados para as leituras carregadas da memória (*Memory Data Processing*), ou para as leituras em tempo real (*Real Time Data Processing*) serão os mesmos, mas estes ficheiros serão gravados em pastas diferentes. O resultado será uma base de dados contendo duas pastas, uma com dados adquiridos da memória e outra com dados adquiridos em tempo real.

5.4.3 Análise e Correlação de dados

O desenvolvimento da aplicação teve como principal finalidade possibilitar ao utilizador por intermédio de representações gráficas a correlação das condições meteorológicas com parâmetros energéticos de sistemas de produção de energia a partir de fontes renováveis. Como mencionado anteriormente, é criada uma base de dados diária com os parâmetros de produção de energia de um gerador eólico e de um conjunto de painéis fotovoltaicos (*Energy Data Base*). No bloco *Data Integration* será feita a correlação desta base de dados (*Energy Data Base*) com a base de dados de condições meteorológicas (*Weather Data Base*).

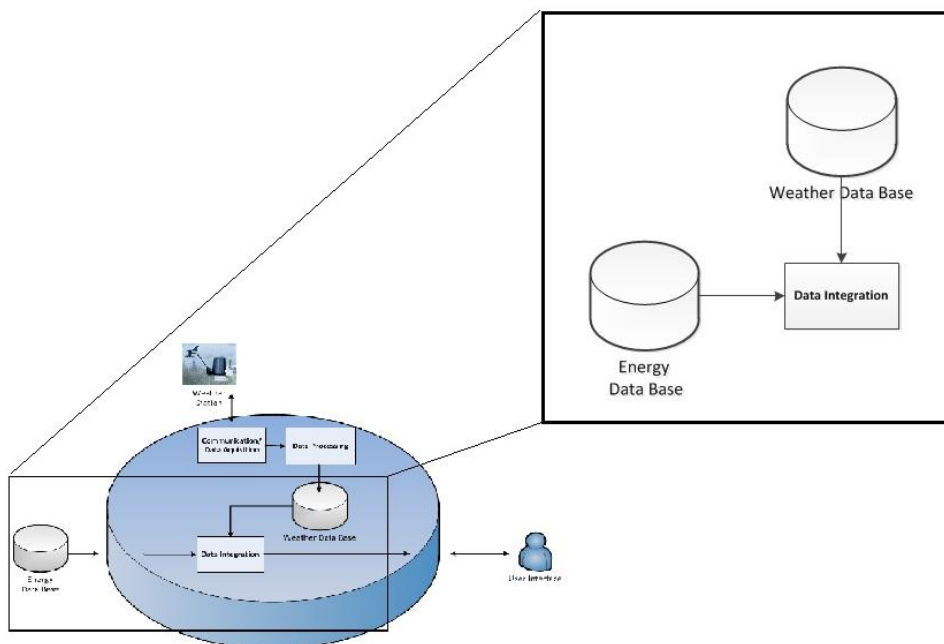


Figura 5.26 – Bloco responsável pela correlação de dados.

Consoante os dados presentes nas bases de dados, é dado ao utilizador a possibilidade de escolher o dia ou intervalo de dias que pretende visualizar/correlacionar dados. O utilizador tem a oportunidade de escolher vários parâmetros (Tabela 5.17) para a correlação de dados, em dois gráficos distintos com eixos diferentes. Existe também a possibilidade de

desenhar o diagrama de rosa-dos-ventos para um dia ou conjunto de dias, correlacionando a velocidade do vento e a sua direcção.

Tabela 5.14 – Variáveis disponíveis para correlação.

Dados do gerador eólico/células fotovoltaicas
Voltage (V) – Tensão eléctrica
Current (A) – Corrente eléctrica
Power (W) – Potência eléctrica
Power Factor – Factor de potência
Reactive Power (VAr) – Potência Reactiva
Active Power (VA) – Potência Activa
Dados meteorológicos
Wind direction (°) – Direcção do vento
Wind Gusts (m/s) – Rajadas de vento
Average Wind Speed (m/s) – Velocidade média do vento
Temperature (°C) – Temperatura
Solar Radiation (W/m^2) – Radiação Solar

A aplicação permite o desenho de gráficos de qualquer uma das variáveis apresentadas na Tabela 5.17 em ordem ao tempo, consoante o dia e hora de leitura. Para além desta funcionalidade, é possível o cruzamento de duas variáveis que não o “tempo”, desenhando uma curva característica entre estas.

Sejam quais forem as variáveis seleccionadas para a análise gráfica, o programa permite várias funcionalidades:

- Fácil movimentação/deslocação da vista do gráfico com a ferramenta “pan”;
- Ligação de eixos entre gráficos;
- Zoom In/Out;
- Mudança de escala automática;
- Cálculo de valores máximos de mínimos;
- Inserção de várias etiquetas contendo os valores das variáveis dos diferentes eixos;
- Aplicação de filtros aos dados apresentados nos gráficos;
- Cálculo da energia total gerada (kilowatt-hora (kWh)).

Em relação à funcionalidade de aplicação de filtros, e devido à grande variação dos valores das variáveis meteorológicas, é possível aplicar aos gráficos desenhados vários filtros de suavização com algoritmos implementados pelo MATLAB ® (Tabela 5.18). Estas funções suavizam as curvas dos gráficos, ou seja, eliminam pontos no gráfico que se destaquem pela sua posição extrema, devido a erros de medição ou grande variabilidade inerente.

Tabela 5.15 – Filtros e métodos de suavização de gráficos disponíveis.

(Adaptado de: www.mathworks.com)

Método	Descrição
1 D Filter (Filtro de 1 Dimensão)	Filtra uma sequência de dados. Este filtro representa uma implementação da forma directa II transposta da equação às diferenças [27].
Moving average filter (Filtro de média com janela movível)	Filtro de média. Aplica um filtro passa baixo com coeficientes iguais ao recíproco da janela (span) escolhida.
Lowess (locally weighted scatterplot smoothing)	Técnica de regressão linear não paramétrica. Aplica uma regressão local usando mínimos quadrados ponderados e um modelo polinomial de 1º grau.
Loess (locally estimated scatterplot smoothing)	Aplica uma regressão local usando mínimos quadrados ponderados e um modelo polinomial de 2º grau.
Rlowess	Uma versão mais robusta de “lowess” que atribui menor peso aos valores atípicos (pontos no gráfico que se destacam pela sua posição extrema, devido a erros de medição ou variabilidade inerente)
Rloess	Uma versão mais robusta de “loess” que atribui menor peso aos valores atípicos (pontos no gráfico que se destacam pela sua posição extrema, devido a erros de medição ou variabilidade inerente)

Para o filtro de média com janela movível é necessária a escolha do valor para a janela, maior ou igual a 3 e sempre ímpar. Para um filtro de média com janela de valor 5, os dados presentes no vector “y” são suavizados de acordo com o seguinte algoritmo:

$$yy(1) = y(1)$$

$$yy(2) = \frac{y(1) + y(2) + y(3)}{3}$$

$$yy(3) = \frac{y(1) + y(2) + y(3) + y(4) + y(5)}{5}$$

$$yy(4) = \frac{y(2) + y(3) + y(4) + y(5) + y(6)}{5}$$

....

O filtro de 1 Dimensão possui um algoritmo bastante próximo ao explicado anteriormente, usando também uma janela móvel, mas devido à maneira como os últimos pontos são tratados, os resultados não serão iguais.

O método de suavização usado nos algoritmos “loess” e “lowess” e respectivas variantes, é semelhante ao usado no filtro de média com janela móvel. Para cada valor “X” que se pretenda suavizar, irá ser calculado um valor “Y”. Para calcular este valor Y, estas técnicas usam uma regressão em pontos num intervalo móvel (janela) em torno do valor X, onde os valores deste intervalo (janela) são classificados com um peso de acordo com a sua distância ao valor X. A “janela”(span) escolhida para estes algoritmos representa uma percentagem do total de pontos de dados, menor ou igual a 1. Estes algoritmos são em termos de computação bastante morosa, e apresentam melhores resultados para grandes amostras de dados. Na figura 5.27 é possível observar o gráfico resultante da aplicação de quatro filtros a dados referentes à velocidade do vento (vermelho). Este gráfico foi conseguido através da aplicação desenvolvida.

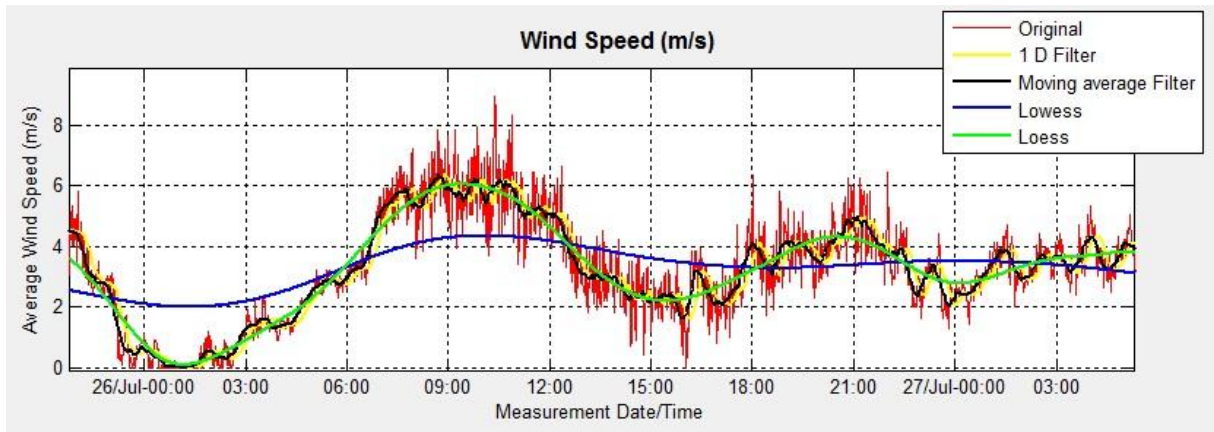


Figura 5.27 – Dados referentes à velocidade do vento (a vermelho), e aplicação de vários filtros:

Filtro de 1-D, Filtro de média com janela móvel, *Lowess* e *Loess*.

Para qualquer gráfico de potência eléctrica, a aplicação desenvolvida calcula a energia eléctrica correspondente, referente ao intervalo de tempo considerado. Para efectuar o cálculo da energia efectua-se uma integração numérica pela regra dos trapézios. Este método assume que o valor entre dois pontos sobe ou desce linearmente para o seguinte valor, fazendo a seguinte aproximação:

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

A Figura 5.28 representa a potência gerada num painel fotovoltaico durante um intervalo de tempo.

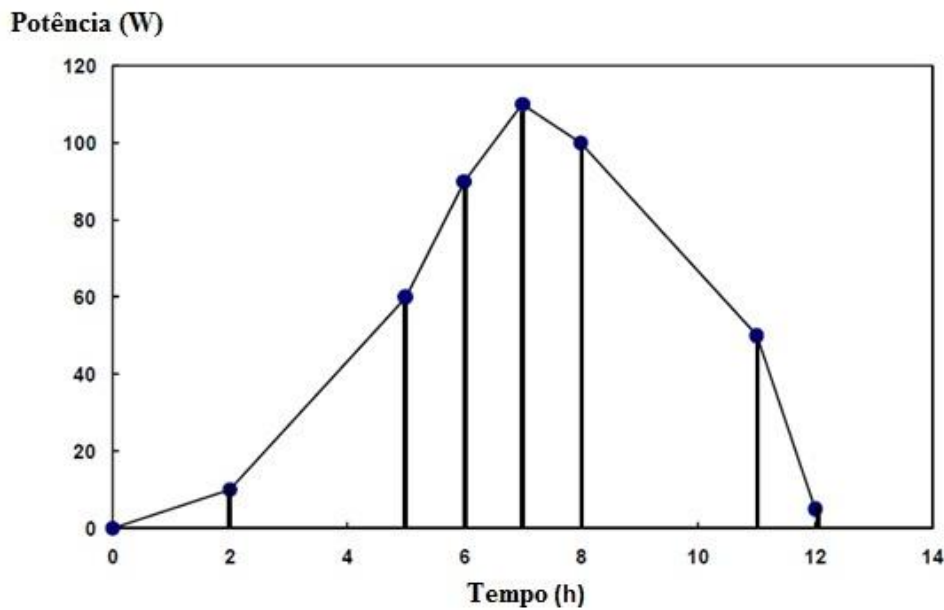


Figura 5.28 – Potência eléctrica produzida por um painel fotovoltaico

A energia será calculada através das áreas, encontrando o valor médio de cada intervalo multiplicado pela largura do intervalo. A energia total será a soma de todas as áreas calculadas. Para o cálculo do integral numérico pela regra dos trapézios foi usada uma função predefinida da ferramenta MATLAB®.

5.4.4 Interface

A interface com o utilizador é um dos pontos-chave da aplicação desenvolvida, de forma a disponibilizar ao utilizador uma simples e fácil interactividade (*user-friendly*).

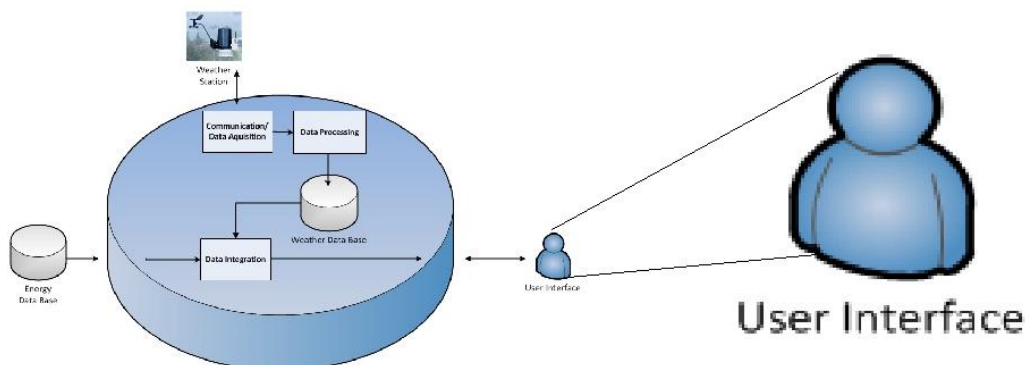


Figura 5.29 – Bloco responsável pela interface com o utilizador

Desenvolveu-se uma interface em que pudesse existir um controlo por parte do utilizador de todos os parâmetros do programa, e para visualização e correlação de dados. A Figura 5.30 mostra a janela principal da interface implementada.

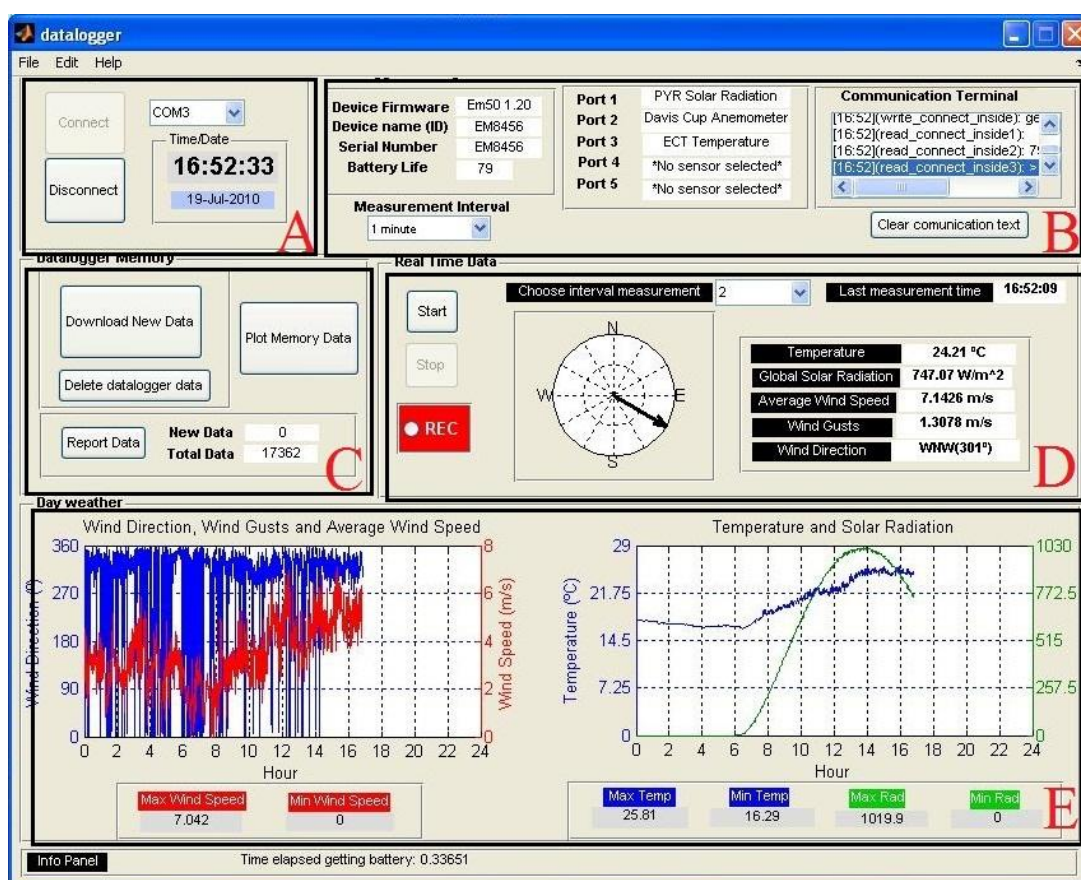


Figura 5.30 – Interface principal da aplicação desenvolvida

É possível analisar na janela principal vários “painéis” importantes identificados por várias letras:

- A - *Datalogger Control* – Iniciar e terminar ligação ao *datalogger* e informação sobre data e hora actual;
- B - *Datalogger Settings* – Informação sobre os parâmetros da estação meteorológica: número da versão de *firmware* do dispositivo (*Device Firmware*), nome do dispositivo (*Device Name (ID)*), número de série único do dispositivo (*Serial Number*), estado da bateria actual (*Battery Life*) e sensores atribuídos a cada porto de comunicação. Terminal de comunicação onde é possível visualizar todas as mensagens trocadas entre a aplicação e o equipamento. Selecção do intervalo de medição para a gravação de dados na memória interna do *datalogger* (*Measurement Interval*);
- C - *Datalogger Memory* – Descarregamento dos novos dados na memória interna do *datalogger* para a base de dados em ficheiros diários MS Excel. Visualização do estado da memória, limpeza da memória interna e abertura de uma nova janela para correlação de dados (Figura 5.31);
- D - *Real Time Data* – Visualização das condições meteorológicas em tempo real com um intervalo de medição mínimo de 2 segundos. Rosa-dos-ventos animada actualizada em tempo real indicando a direcção do vento. Possibilita a gravação dos dados meteorológicos em tempo real para a base de dados (*Weather Data Base*).
- E - *Day weather* - Visualização da evolução das condições meteorológicas referentes ao dia actual em dois gráficos. Informação sobre os valores máximos e mínimos atingidos no dia actual. Estes dados são carregados através da base de dados.

Para além desta janela principal do programa, é possível abrir outra janela onde é feita a escolha de dados a correlacionar. (Figura 5.31). As variáveis a correlacionar encontram-se apresentadas na Tabela 5.14.

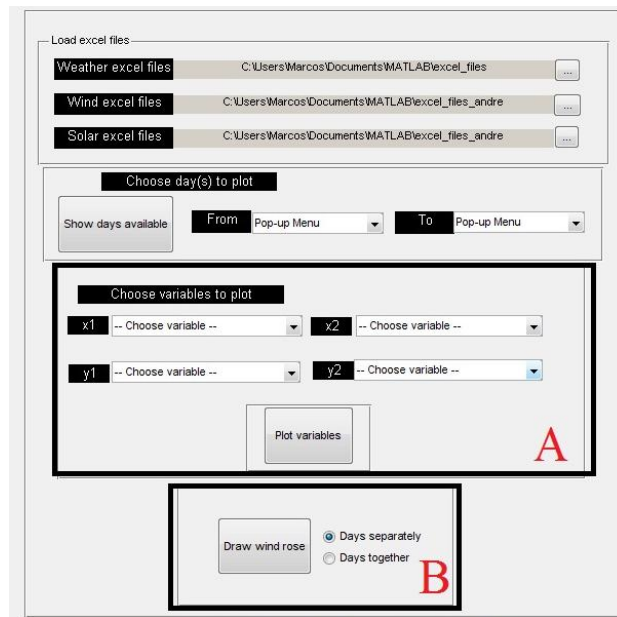


Figura 5.31 – Interface do programa responsável pela escolha de dados para correlação

Esta janela possui dois “painéis” particularmente importantes:

- *A – Plot variables* – Possibilidade de elaborar gráficos escolhendo para isso várias variáveis para o eixo das ordenadas e abcissas. Estas variáveis dizem respeito às condições meteorológicas e aos parâmetros eléctricos dos dois sistemas de energia renovável (Tabela 5.14). Para além destas variáveis, é possível obter a energia eléctrica total produzida e o coeficiente de potência para o intervalo de dias escolhido. A nova janela obtida apresenta os gráficos correlacionando as variáveis seleccionadas, assim como um painel onde o utilizador poderá optar pela aplicação de vários filtros a estes gráficos (Tabela 5.15) e onde são indicados os valores máximos e mínimos de cada curva representada.

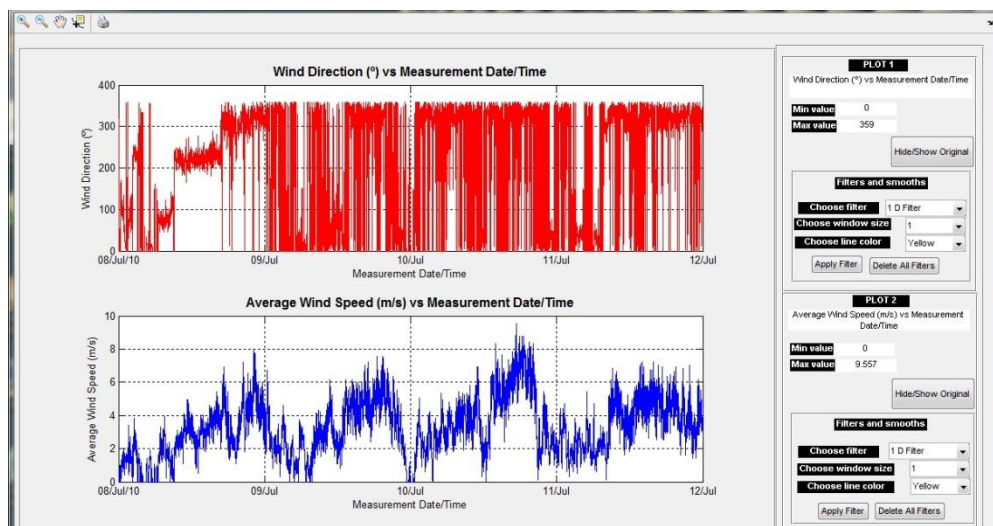


Figura 5.32 – Interface do programa para apresentação e tratamento de dados correlacionados

- B – *Draw wind rose* – Possibilidade de elaborar o diagrama da rosa-dos-ventos para um ou vários dias. Atribuição de várias cores para diferentes intervalos de velocidades do vento. O resultado será uma nova janela com a rosa-dos-ventos pretendida (Figura 5.33).

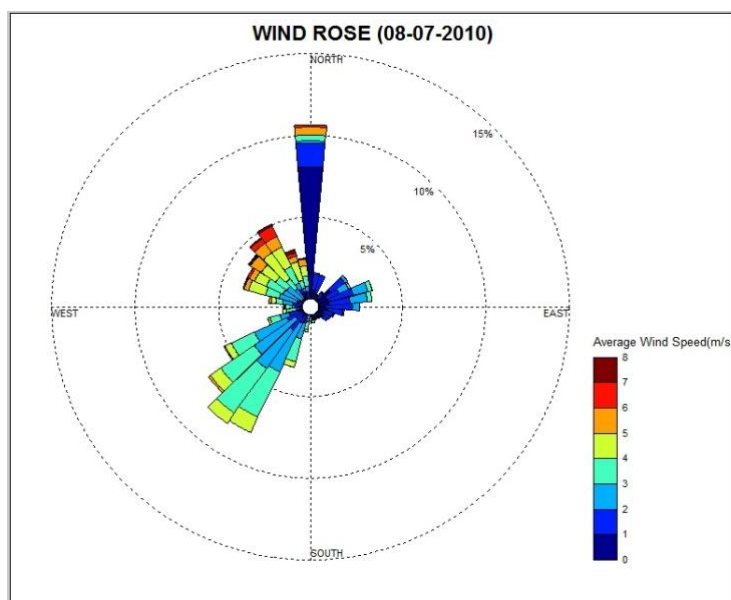


Figura 5.33 – Interface do programa para apresentação da rosa-dos-ventos.

Capítulo 6

Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentam-se vários gráficos produzidos pela aplicação desenvolvida. De seguida apresentam-se dados relativos às condições meteorológicas e aos parâmetros de geração de energia do gerador eólico e dos painéis fotovoltaicos referentes a sete dias consecutivos (de dia 23 a 29 de Julho de 2010). A estação meteorológica foi configurada de forma a adquirir dados em intervalos de um minuto, resultando em 1440 leituras por dia. O sistema de aquisição de dados de geração adquiriu dados em intervalos de 10/11 segundos, resultando em cerca de 8000 leituras por dia.

6.1 Recurso eólico

Para o período em análise, a Figura 6.1 apresenta os valores obtidos para as condições meteorológicas relacionadas com o recurso eólico (velocidade e direcção do vento).

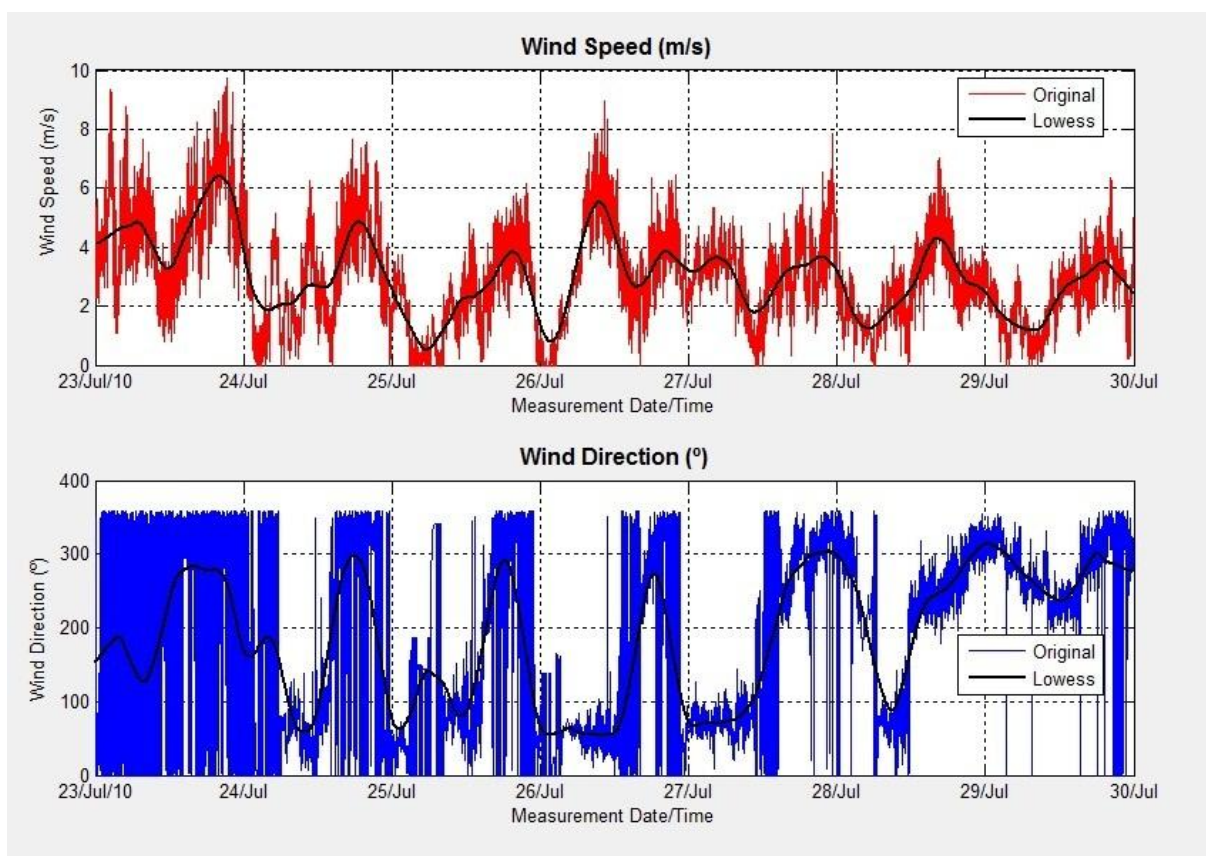


Figura 6.1 – Velocidade do vento (cima). Direcção do vento (baixo)

A cada um dos gráficos foi aplicado o filtro *Lowess* com uma janela (*span*) de 0,05, para eliminar as frequências do vento associadas às zonas micrometeorológicas do espectro do vento [12]– representado a preto na Figura 6.1. A primeira característica observada pelos gráficos desenhados é a grande variabilidade da velocidade e direcção do vento. No intervalo de dias escolhido a Estação do ano diz respeito ao Verão, caracterizada por uma predominância de ventos de velocidades de baixa intensidade, classificados como brisas ligeiras ou moderadas na escala de *Beaufort* (Tabela 2.2). Essa predominância pode ser observada no gráfico, onde a velocidade do vento durante o intervalo de dias escolhido não ultrapassa o valor de 10 m/s. Em relação à direcção do vento, são visíveis maioritariamente ventos de Norte (0 e 360°) e de Este (90°). A aplicação do filtro na zona onde os ventos são maioritariamente de Norte (0 e 360°), onde existem vários saltos no gráfico entre 0 e 360°, pode levar a uma imagem distorcida da situação real, visto os valores 0 e 360° representarem a mesma direcção para o vento. Para uma melhor visualização da predominância da direcção do vento foi desenhada uma rosa-dos-ventos referente ao intervalo dias em questão.

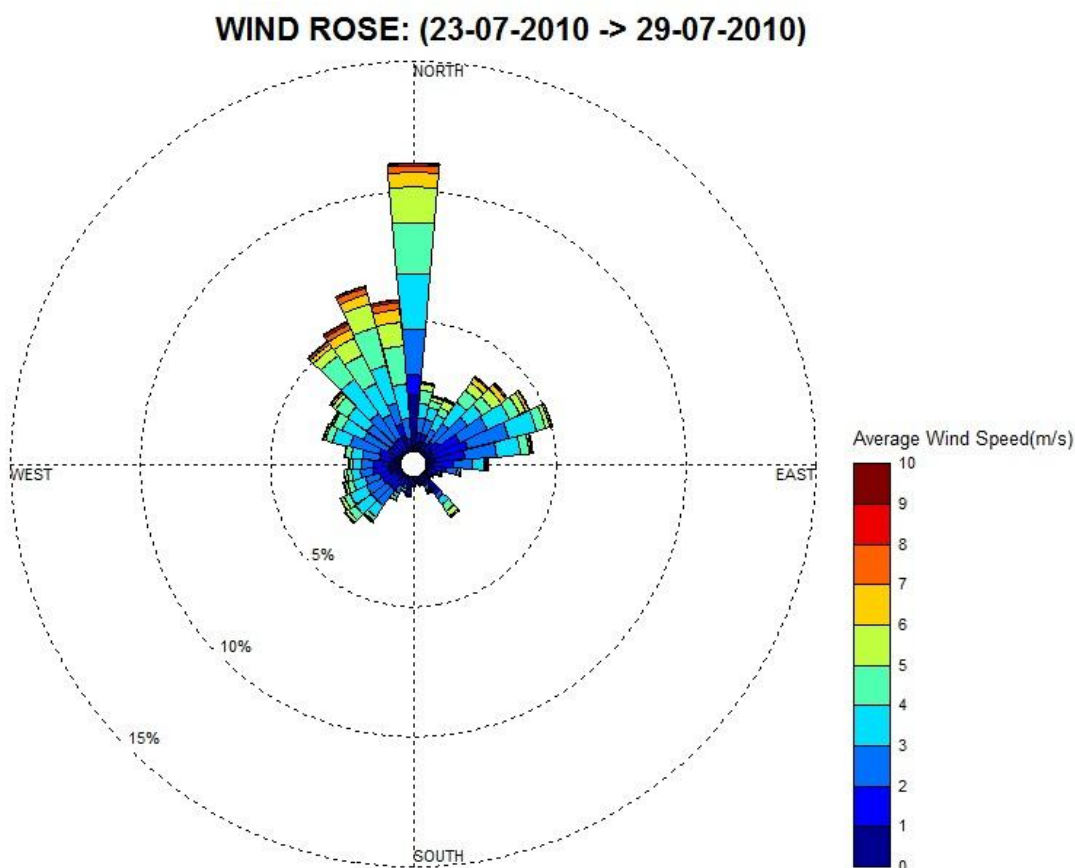


Figura 6.2 – Rosa-dos-ventos

Pela observação da rosa-dos-ventos da Figura 6.2, é reforçada a conclusão anterior, onde existe uma clara evidência de predominância de ventos no 1º e 4º quadrante. A rosa-dos-ventos permite também uma análise da velocidade do vento predominante em termos percentuais, existindo uma clara predominância de ventos com velocidades entre 1 e 5 m/s.

6.2 Correlação entre Recurso eólico e Energia produzida

A partir dos valores adquiridos da velocidade do vento, sabendo a área circular das pás da turbina atravessada pelo vento ($A = \pi \cdot R^2$, com $R=1,6$ m) e calculando a densidade do ar a partir da temperatura lida de cada leitura (Tabela 2.7), foi possível calcular a potência mecânica do vento com a seguinte equação:

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (6.1)$$

Na Figura 6.3 apresentam-se os seguintes gráficos, um com a velocidade do vento e outro correlacionando a potência mecânica do vento e a potência eléctrica gerada.

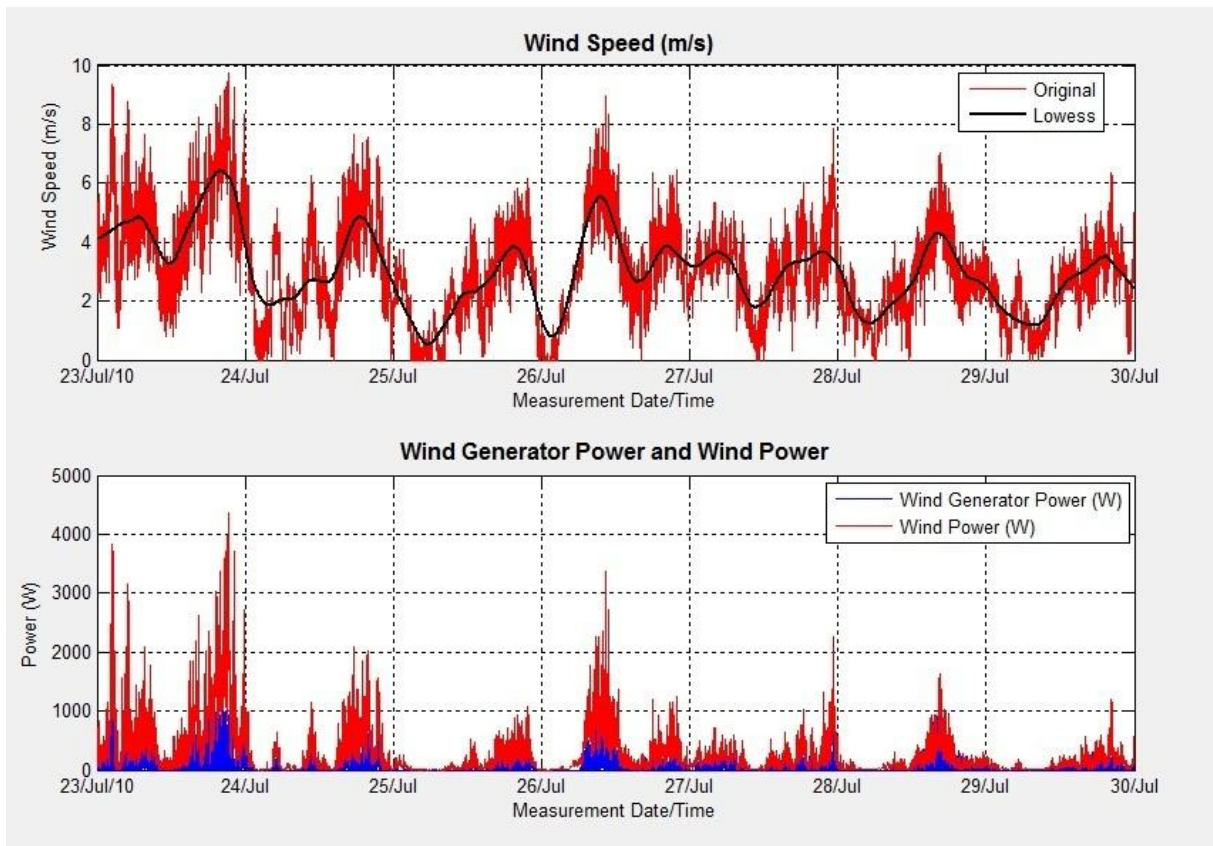


Figura 6.3 – Velocidade do vento (cima).

Potência do vento (P_{vento}) e potência eléctrica gerada (P_{elect}) (baixo)

Tal como descrito na secção 2.5, verifica-se que a potência disponível do vento é superior à potência eléctrica gerada pela turbina eólica, devido a todas as perdas associadas. Como seria de esperar, a potência do vento e potência eléctrica são directamente proporcionais ao cubo da velocidade do vento (equação 1.6).

Na próxima imagem foi analisada em mais pormenor apenas a potência eléctrica.

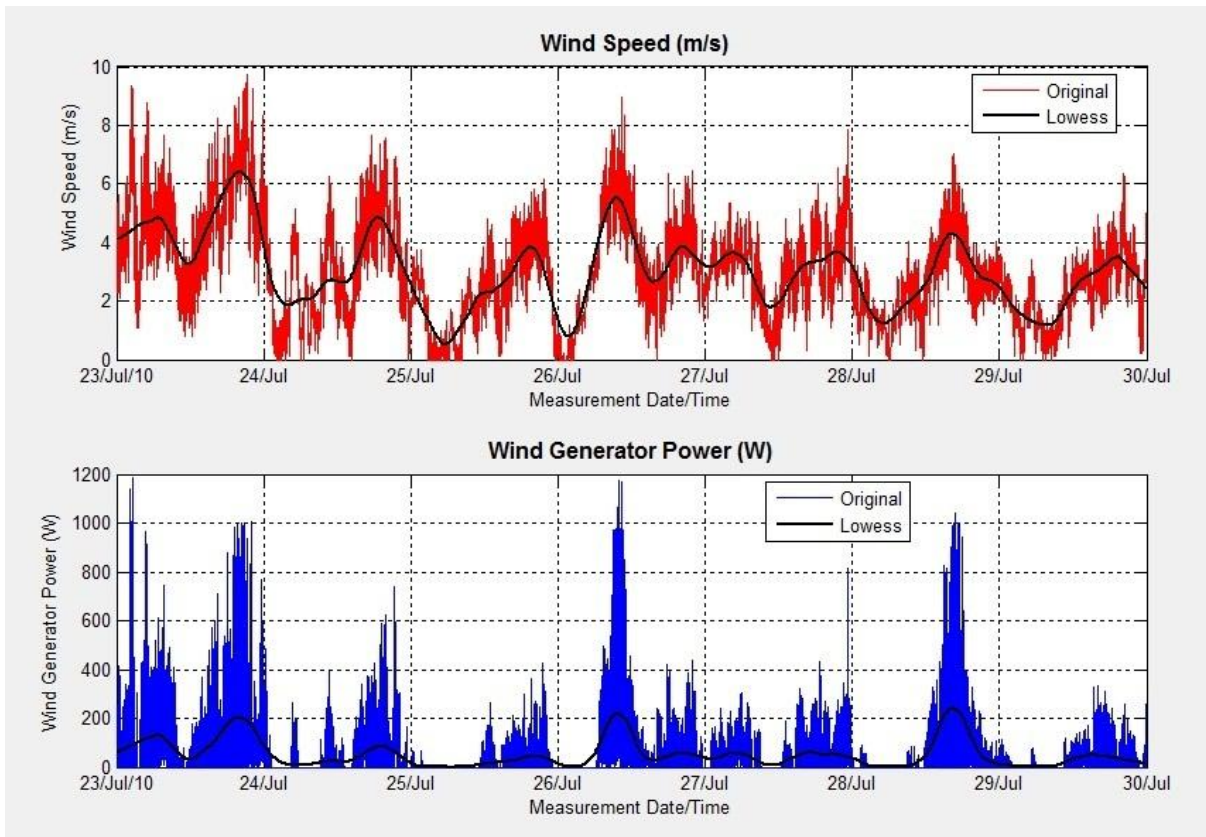


Figura 6.4 – Velocidade do vento (cima). Potência eléctrica gerada (baixo)

Por análise dos gráficos podem ser observados vários picos de potência que dizem respeito aos valores de geração máxima da turbina eólica. Estes valores de potência estão associados a velocidades de vento na ordem dos 4 a 10 m/s. Embora o gerador eólico possua uma potência estipulada de 2000 W para velocidades de vento de 9 m/s (Tabela 5.1), a potência máxima produzida pelo gerador eólico neste intervalo de dias foi cerca de 1200 W para velocidades de 8 m/s. Aliado à velocidade, também a direcção do vento influenciará o rendimento do gerador. Isto é, em alturas em que a direcção do vento varie com frequência, haverá perdas de aproveitamento do potencial do vento, devido à inércia inerente ao sistema mecânico do gerador eólico em orientar a turbina com a nova direcção do vento. A partir do gráfico anterior da potência eléctrica gerada é possível determinar a energia total produzida

durante o período em análise. A energia eléctrica produzida pelo gerador eólico durante este período foi de 8,72 kWh. Tendo em conta que, para o mesmo período o Departamento de Engenharia Electrotécnica teve um consumo energético de 2076 kWh, o gerador eólico apenas cobriu cerca de 0,42 % do consumo energético total do edifício. Embora este valor seja muito pequeno, o que não representa uma surpresa, é preciso ter presente que o gerador eólico tem uma potência máxima de 2 kW, as velocidades do vento atingidas neste período foram relativamente baixas, para além que este edifício encontra-se aberto 24 horas diárias e com muitos equipamentos constantemente ligados.

O coeficiente de potência para cada instante pode ser calculado através da seguinte equação:

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{vento}}} \quad (6.2)$$

Onde, a $P_{\text{útil}}$ representa a potência mecânica gerada, e P_{vento} a potência disponível no vento. Embora o coeficiente de potência seja calculado a partir da potência mecânica, apenas possuímos a potência eléctrica entregue à rede (P_{elect}). Foi admitido um rendimento para o sistema eléctrico (gerador síncrono e conversor electrónica de potência) de 90%, calculando o coeficiente de potência da seguinte forma:

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{vento}}} = \frac{\frac{P_{\text{elect}}}{0,90}}{P_{\text{vento}}} = \frac{P_{\text{elect}}}{P_{\text{vento}} * 0.90} \quad (6.3)$$

Consequentemente foi desenhado um gráfico com o andamento do coeficiente de potência para o intervalo de dias em questão, que pode ser comparado com a potência do vento e potência eléctrica gerada pela turbina eólica (Figura 6.5). O coeficiente de potência obtido encontra-se maioritariamente entre os 0,1 e 0,4, valores típicos esperados para geradores eólicos de baixa potência. Quando não existe potência de saída o coeficiente de potência é nulo.

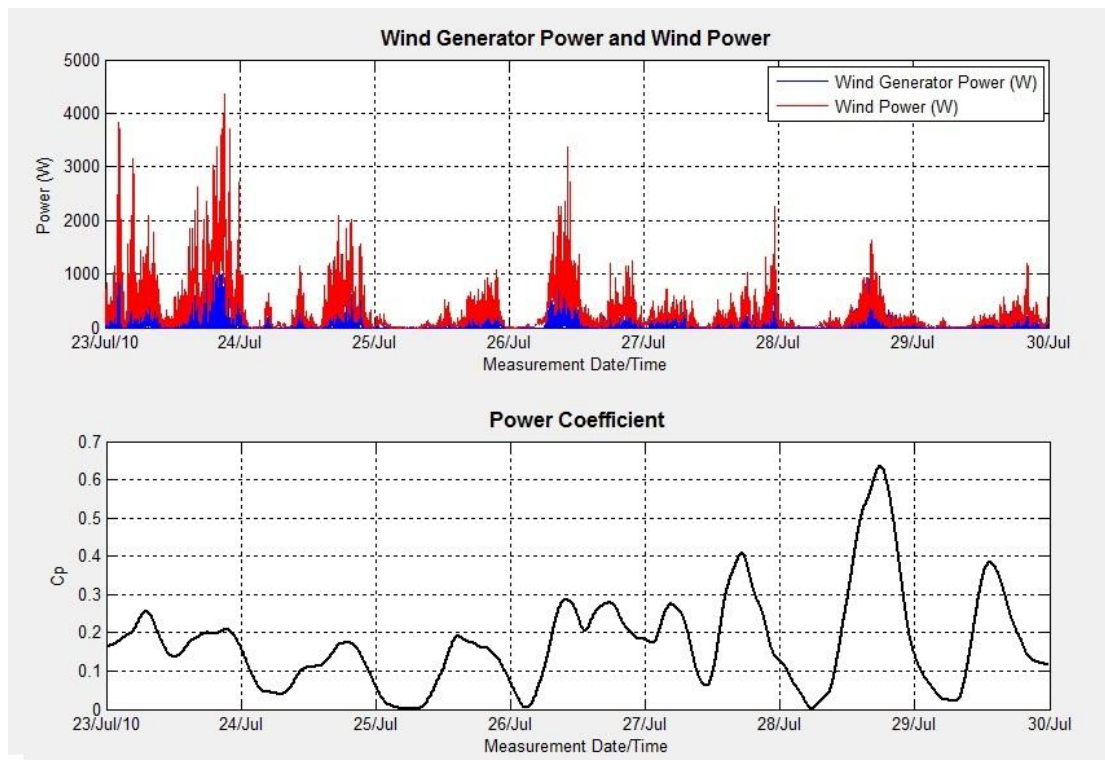


Figura 6.5 – Potência do vento (P_{vento}) e potência eléctrica gerada (P_{elect}) (cima)

Coeficiente de potência (C_p) (baixo)

A Figura 6.6 representa um gráfico que correlaciona a velocidade do vento com a potência eléctrica gerada, ou seja, a curva de potência do sistema, para o intervalo de dias em questão.

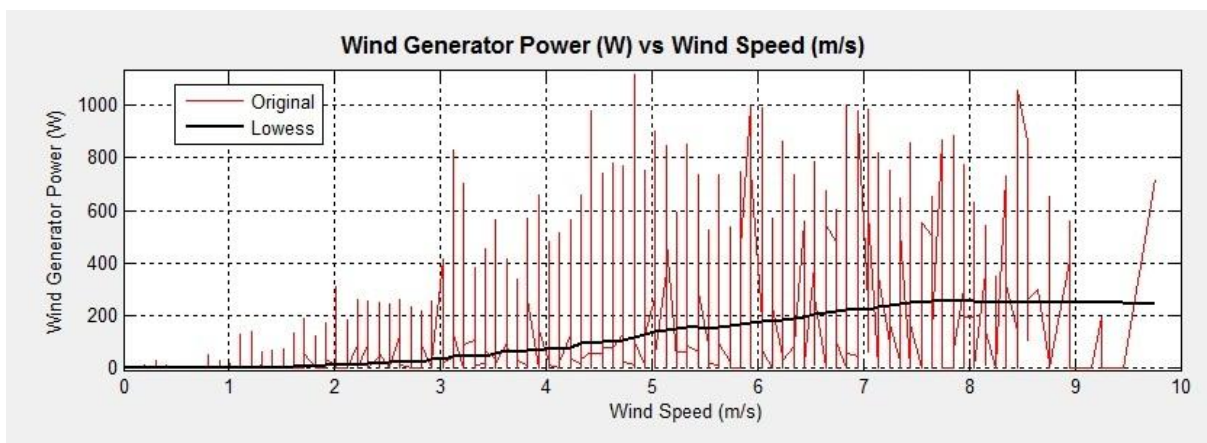


Figura 6.6 – Potência eléctrica gerada em função da velocidade do vento

É possível observar uma relação praticamente proporcional da velocidade do vento com a potência gerada. Para velocidades do vento superiores a 6/7 m/s a potência eléctrica pode ser considerada praticamente constante.

6.3 Recurso Solar

As variáveis meteorológicas importantes a considerar para o recurso solar são a radiação solar e a temperatura. Estas variáveis para o intervalo de tempo em questão são apresentadas nos próximos gráficos.

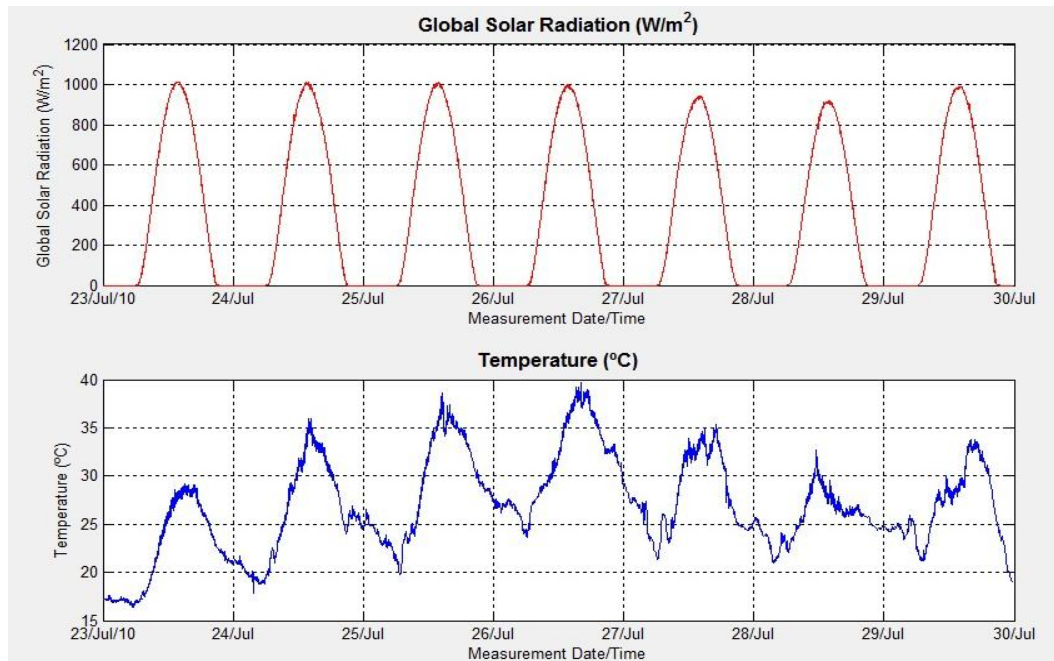


Figura 6.7 – Radiação solar (cima). Temperatura ambiente (baixo)

A partir da Figura 6.7 pode ser observado o andamento da radiação solar ao longo de sete dias. Para cada dia é observado uma curva típica de radiação solar (Figura 3.5), atingindo o seu valor máximo de cerca de 1000 W/m^2 entre as 13 e 14 horas. A temperatura observada apresenta um andamento semelhante ao da radiação solar, mas mais variável ao longo do tempo. Um dos factores que condiciona muito a temperatura é a velocidade do vento. Essa influência pode ser observada comparando o dia 23 com o dia 26, que embora apresentem curvas de radiação solar com valores muito semelhantes, o mesmo não acontece para a temperatura. As temperaturas máximas atingidas nos dias 23 e 26 são respectivamente 29°C e 40°C . As velocidades do vento no dia 23 foram superiores às atingidas no dia 26, influenciando as temperaturas atingidas (Figura 6.1 – Velocidade do vento).

6.4 Correlação entre Recurso Solar e Energia produzida

A radiação solar foi comparada com a potência eléctrica gerada pelos painéis fotovoltaicos.

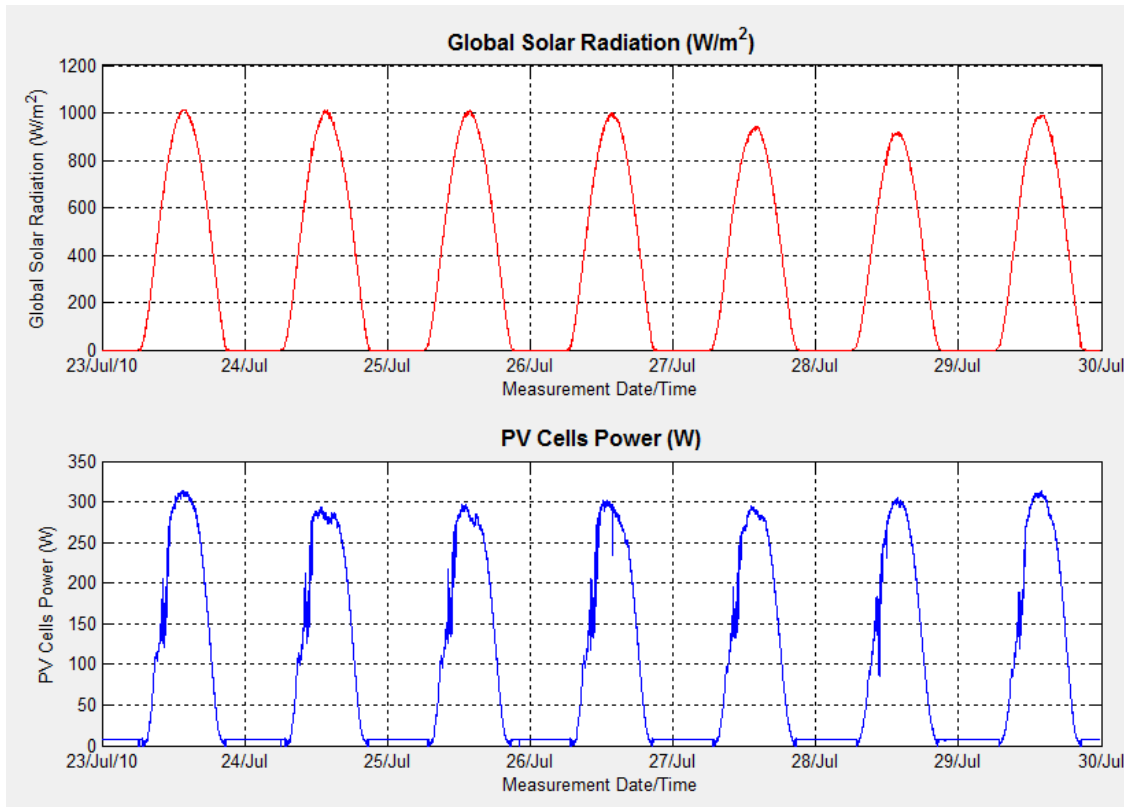


Figura 6.8 – Radiação solar (cima). Potência eléctrica gerada (baixo)

A potência eléctrica gerada tem um andamento muito semelhante às curvas de radiação solar. Os picos de potências atingidos coincidem com os valores de radiação solar mais elevados medidos em cada dia. Para além da radiação solar, é também importante analisar as temperaturas atingidas nesses picos, que poderão influenciar as potências eléctricas produzidas – ver mais à frente. O valor máximo atingido para a potência eléctrica foi cerca de 314 W para uma radiação solar de $1010 W/m^2$ às 13:30 horas do dia 23. A energia eléctrica produzida durante esta semana foi calculada em 16,52 kWh. Considerando que, para o mesmo período o Departamento de Engenharia Electrotécnica teve um consumo energético de 2076 kWh, os painéis fotovoltaicos cobriram apenas cobriram cerca de 1,22% do consumo energético total do edifício.

Uma relação directamente proporcional entre a radiação solar e a potência eléctrica pode ser verificada no gráfico da Figura 6.9.

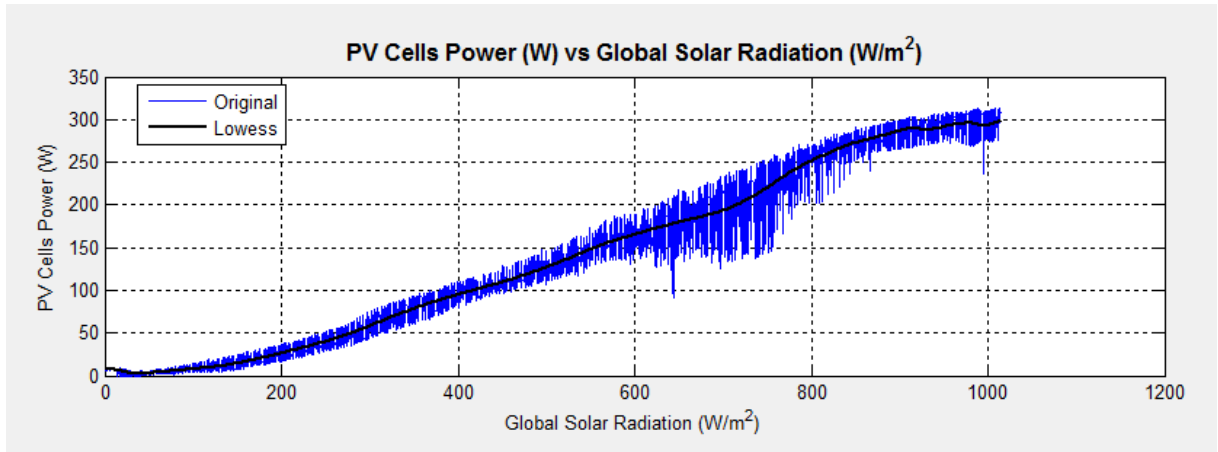


Figura 6.9 –Potência eléctrica gerada em função da radiação solar

Considerando para o conjunto de sete painéis fotovoltaicos nas condições STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$) uma potência máxima de $P_{m\acute{a}x} = 460 \text{ W}$ e uma área total de $A = 6,4 \text{ m}^2$ (Tabela 5.2), o rendimento máximo deste conjunto de painéis poderá ser calculado da seguinte forma:

$$\eta_{STC} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{P_{solar}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A \cdot G} = \frac{460}{6,4 \cdot 1000} \approx 0,072$$

O rendimento máximo de conversão de potência solar dos painéis solares, nas condições STC, será então de 7,2 %. No entanto para as condições reais no intervalo de dias em questão, é possível através da potência solar disponível (P_{solar}) (variável com a radiação solar) e da potência eléctrica gerada (P_{elect}), calcular o rendimento de conversão de potência solar:

$$\eta = \frac{P_{elect}}{P_{solar}} = \frac{P_{elect}}{A \cdot G}$$

Consequentemente, foi obtido o seguinte gráfico (Figura 6.10), onde se pode observar rendimentos máximos de cerca de 5,2 %, nas horas de maior intensidade de radiação solar incidente.

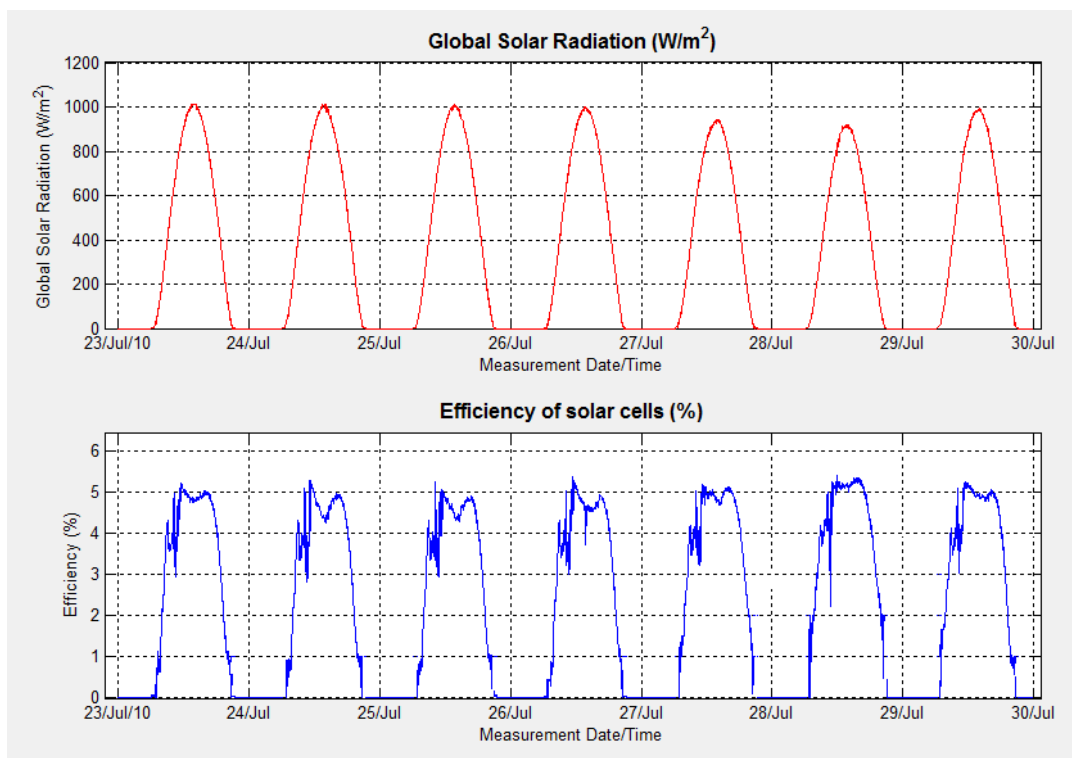


Figura 6.10 – Irradiância (cima). Rendimento da conversão de energia solar (baixo)

A temperatura também poderá ser relacionada com a potência eléctrica, ao longo do tempo (Figura 6.11). A influência da temperatura na potência eléctrica das células pode ser comprovada analisando os dias 23, 26 e 29. Para cada um dos dias em análise verifica-se uma curva diária de radiação solar bastante semelhante (Figura 6.8).

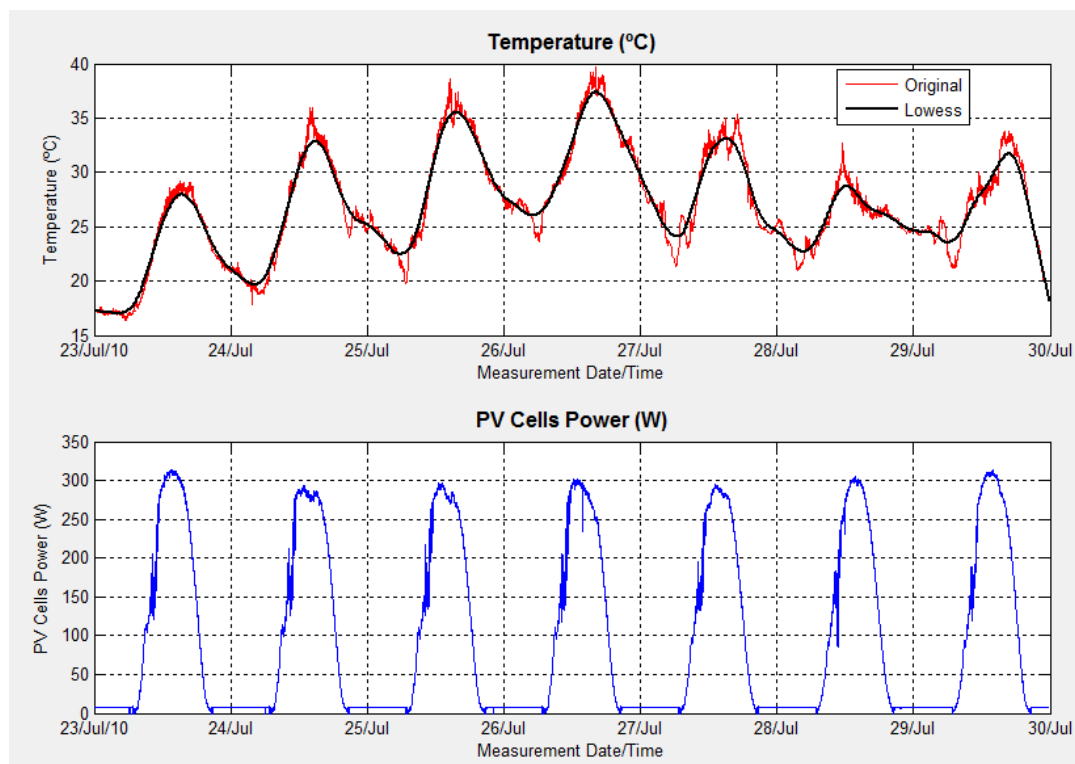


Figura 6.11 – Temperatura ambiente (cima). Potência eléctrica gerada (baixo).

No entanto, devido às temperaturas elevadas no dia 26, pode ser observada uma potência eléctrica ligeiramente menor quando comparada com as potências atingidas no dia 23 e 29. Nunca esquecendo a radiação solar existente, esta observação pode, de certa forma, demonstrar que a potência eléctrica gerada pode decrescer com o aumento da temperatura, tal como o rendimento da célula (Figura 3.11).

A potência eléctrica produzida pelas células fotovoltaicas será sempre fortemente dependente da radiação solar nunca esquecendo a temperatura em questão. É importante existir sempre uma análise paralela entre estas duas variáveis dependentes entre si.

Capítulo 7

Conclusões

A realização deste trabalho permitiu a implementação de um sistema que interliga a aquisição de dados meteorológicos com dados de produção de energia eléctrica de dois sistemas de energias renováveis, nomeadamente um conjunto de painéis fotovoltaicos e um gerador eólico de baixa potência. O sistema possibilita uma análise integrada de várias variáveis envolvidas, através de uma interface gráfica interactiva com o utilizador. As vantagens de uma interface acessível e interactiva com o utilizador permite, de uma forma simplificada analisar a energia eléctrica produzida por estes sistemas face às condições meteorológicas existentes.

As características deste sistema e todas as suas funcionalidades, permitem que no futuro, possa existir o desenvolvimento de inúmeros projectos de investigação, tal como a análise e caracterização do local a partir das condições meteorológicas (para dados recolhidos preferencialmente durante um longo intervalo de tempo), o estudo da eficiência energética dos sistemas de energias renováveis e o possível controlo destes sistemas consoante as condições meteorológicas existentes. O sistema desenvolvido representa um produto acabado, possível de ser instalado e operado num qualquer local onde exista produção de energia a partir de fontes renováveis. As potencialidades deste sistema são inúmeras, podendo ser utilizado por instituições ou empresas relacionadas com sistemas de energias renováveis, meteorologia, ou até mesmo pelo utilizador privado que se interesse por monitorizar a produção de energia eléctrica dos seus sistemas de energia renovável instalados na sua habitação. As funcionalidades existentes na aplicação poderão ser apresentadas para visualização e curiosidade do público em geral, tal como usadas em laboratórios práticos de disciplinas leccionadas na Universidade, tornando-os do ponto de vista prático bastante interessantes.

A realização deste trabalho permitiu adquirir conhecimentos em várias áreas de interesse, cimentando outras, resultando num produto acabado possível de ser instalado e operado, com várias funcionalidades do ponto de vista da análise e correlação.

Como trabalho futuro, enriquecedor do sistema implementado, sugere-se: O desenvolvimento de uma aplicação que seja capaz de comunicar através de um *browser* com o sistema desenvolvido de forma a disponibilizar dados na Internet para carregamento e visualização; A integração de outras fontes de produção renovável, incluindo as respectivas variáveis meteorológicas de interesse.

Bibliografia

- [1] Volker Quaschnig, *Understanding Renewable Energy Systems*. London: Earthscan, 2005.
- [2] IEA, *World Energy Outlook 2009*. Paris: International Energy Agency Publications, 2008.
- [3] Arnold I. Finklin and William C. Fischer, *Weather Station Handbook - an Interagency Guide for Wildland Managers*. U.S.A.: National Wildfire Coordinating Group, 1990.
- [4] World Meteorological Organization. World Weather Information Service - Official Observations. Official Forecasts. [Online]. <http://worldweather.wmo.int/>
- [5] Instituto de Meteorologia. Instituto de Meteorologia, IP Portugal. [Online]. <http://www.meteo.pt/pt/index.html>
- [6] HAMweather. (2008) Personal Weather Stations. [Online]. <http://www.pwsweather.com/>
- [7] University of Otago. (2009) University of Otago - Department of Physics. [Online]. <http://www.physics.otago.ac.nz/nx/eman/weather-station.html>
- [8] João Carlos Amador Guerreiro, *Dissertação de Mestrado apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa - Eficiência Energética, Sistema de Monitorização de Consumos de Energia.*, 2009.
- [9] John E. Oliver, *Encyclopedia of World Climatology*. The Netherlands: Springer, 2005.
- [10] Frederick K. Lutgens and Edward J. Tarbuck, *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. Illinois, U.S.A.: Prentice Hall, 2007.
- [11] Luis Salvador and Edgar Casimiro. (2009) Meteo Cais do Sodré (Lisboa) - Dados meteorológicos em tempo real. [Online]. www.meteocaisdosodre.info
- [12] Rui M.G. Castro, *Introdução à Energia Eólica*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2003.
- [13] Fernando D. Bianchi, Hernán Battista, and Ricardo J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems.*: Springer, 2007.
- [14] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*. New York, U.S.A.: Taylor and Francis Group, 2006.

- [15] Robert Foster, Majid Ghassemi, and Alma Cota, *Solar Energy - Renewable Energy and the Environment*. U.S.A.: Taylor & Frances Group, 2010.
- [16] Rui M.G. Castro, *Introdução à Energia Fotovoltaica*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2002.
- [17] Soteris Kalogirou, *Solar Energy Engineering - Processes and Systems*. UK: Elsevier Inc., 2009.
- [18] Tim Bitson, *Weather Toys*. Indiana, U.S.A.: Wiley Publishing Inc., 2006.
- [19] Garg H. P. and Prakash, *Solar Energy : Fundamentals and Applications.*: Tata McGraw-Hill, 1997.
- [20] Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, and Ervin Bossanyi , *Wind Energy Handbook*. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [21] Mohamed Benghanem and Abdelbaki Maafi, "Data Acquisition System for Photovoltaic Systems Performance Monitoring," *IEEE*, Fevereiro 1998.
- [22] N. Forero, J.Hernández, and G. Gordillo, "Development of a monitoring system for a PV solar plant," *Elsevier*, 2006.
- [23] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis, "Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring," *Elsevier*, Novembro 2001.
- [24] Decagon, *Em50 Series Data Collection System - User's Manual.*: Decagon Devices, Inc., 2010.
- [25] Decagon, *Davis Cup Anemometer - Installation Guide.*: Decagon Devices, Inc., 2009.
- [26] Apogee, *Pyranometer - SP-110.*: Apogee Instrument Inc.
- [27] Monson H. Hayes, *Processamento Digital de Sinais.*: Bookman, 2006.
- [28] Eudyce Pontes da Silva, "Energia eólica: Considerações Teóricas e Aplicação Prática," 1992.
- [29] F. R. Martins, R. A. Guarnieri, and E. B. Pereira, "O aproveitamento da energia eólica," 2008.
- [30] Martin O.L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*. London, UK: Earthscan, 2008.
- [31] Edward Linacre and Bart Geerts, *Climates & Weather Explained*. London, UK: Routledge, 1997.
- [32] Jacqueline Smith, *The Facts On File Dictionary of Weather and Climate*. New York,

- U.S.A.: Infobase Publishing, 2001.
- [33] Alexandra Ribeiro and Isabel Sepúlveda, *Acetatos Teóricos da disciplina Climatologia.*: Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
 - [34] Raphael Mukaro and Xavier Francis Carelse, "A Microcontroller-Based Data Acquisition System for Solar Radiation and Environmental Monitoring," *IEEE*, Dezembro 1999.
 - [35] G.Blaesser, "PV system measurements and monitoring: The European experience," *Elsevier*, 1997.
 - [36] Teresa M. Esteves, *Base de Dados do Potencial Energético do vento em Portugal - Metodologia e Desenvolvimento*. Lisboa: Universidade de Lisboa - Faculdade de Ciências, 2004.
 - [37] Davis Instruments, *Weather Link for Vantage Pro2.*: Davis Instruments, 2009.
 - [38] Davis Instruments, *Vantage Pro 2 - Weather Envoy Manual.*: Davis Instruments.
 - [39] Campbell Scientific, *VisualWeather - Software for Weather Stations.*: Campbell Scientific, 2009.

Anexos

Anexo A - Comandos de controlo do *Datalogger Em50*

Os comandos de controlo gerais suportados pelo equipamento *Datalogger Em50* são enunciados na Tabela A1.

Tabela A1 – Comandos de controlo gerais suportados pelo *datalogger Em50*

Comandos de controlo gerais	Descrição
get [param]	Obtém o valor do parâmetro [param]
set [param]	Define o valor do parâmetro [param]
show	Retorna informação sobre o dispositivo (bom para detecção de erros)
scan	Retorna os valores lidos dos sensores de todos os 5 portas, retornando os dados no formato <i>raw</i> .
dump [param]	Controla a transferência de dados armazenados em memória por pacotes
erase	Elimina todos os dados guardados em memória (O comando <i>yes</i> é enviado logo depois, para confirmar a eliminação de todos os dados)

Os parâmetros [param] permitidos para os comandos gerais “*get*” e “*set*” são apresentados na tabela A2. Alguns apenas serão compatíveis com o comando de controlo “*get*”, ou seja, representam parâmetros apenas de leitura. Quando usado o comando “*set*”, o parâmetro [param] é seguido pelo valor escolhido pelo utilizador.

Tabela A2 – Comandos de controlo *set* e *get*, suportados pelo *datalogger Em50*

Comandos set [param] e get [param]	Descrição
get –batt	Retorna o estado da bateria do dispositivo (Apenas leitura)
set –baud [rate]	Velocidade de transmissão (<i>baud rate</i>). Quando usado com “ <i>set</i> ”, o valor de [rate] poderá ser : <ul style="list-style-type: none">• 0 (9600 – por omissão)

	<ul style="list-style-type: none"> • 1 (19200) • 2 (38400) • 3 (57600) • 4 (115200)
get –baud	Retorna a velocidade de transmissão (<i>baud rate</i>) definida pelo utilizador com o comando “set –baud [rate]”
get –error	Retorna o número de resets feitos ao dispositivo e erros de memória ocorridos.
set –error 0	Elimina o valor de “error” para zero
set –i [name]	Nome do dispositivo ou ID. O valor [name] tem um limite máximo de 8 caracteres alfanuméricos (espaços são ilegais).
get –i	Retorna o nome do dispositivo ou ID.
get –sn	Retorna o número de série do dispositivo (leitura)
get –ver	Retorna a versão de <i>firmware</i> do dispositivo (leitura)
set –d [date]	Data do dispositivo. Para definir o valor da data [date] usar o seguinte formato: set –d yyyy-mm-dd.
get –d	Retorna a data do dispositivo.
set –t [time]	Hora do dispositivo. Para definir o valor da hora [time] usar o seguinte formato: set –t hh:mm
get –t	Retorna a hora do dispositivo.
set –w [interval]	Intervalo de medição para armazenamento de dados em memória, em minutos. O valor do intervalo [interval] é definido em minutos de 1 a 1440 (24 horas). Para 10 segundos o valor será “999”, e para desactivar a gravação de dados “0”.
get –w	Retorna o intervalo de medição definido.
set –padc [cycle]	Aplica um filtro de redução de ruído eléctrico proveniente do sistema de alimentação de corrente alternada. O valor [cycle] é escolhido de forma a corresponder à frequência da rede eléctrica onde o sistema é usado. Para a América do Norte e maior parte da Ásia, o valor é de 60 Hz (valor por omissão), enquanto na Europa é 50 Hz.
get –padc	Retorna a frequência da rede escolhida para a aplicação do filtro de redução de ruído eléctrico.
set –port [n] [value]	<p>Associa a cada porto [n] um tipo de sensor [value].</p> <p>O valor [n] representa o número do porto e poderá ter valores de 1 a 5. O valor [value] representa um número de identificação para cada tipo de sensor. Para os sensores adquiridos o valor [value] poderá ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 186 – Anemómetro <i>Davis Cup</i>, • 250 – Piranómetro <i>PYR Solar Radiation</i>, • 254 – Termómetro <i>ECT Temperature</i>,

	<ul style="list-style-type: none"> • 255 – Nenhum sensor atribuído ao porto.
get – port	Retorna os números de identificação de sensores [value], para cada porto, definidos anteriormente com o comando “set”.

O comando de controlo “*dump [param]*” diz respeito ao descarregamento de dados em memória, e o parâmetro [param] poderá ter os seguintes valores:

Tabela A3 – Comando de controlo *dump*, suportados pelo *datalogger* Em50

Comando <i>dump [param]</i>	Descrição
<i>dump –enum –all 65535</i>	Retorna o número total de leituras armazenadas em memória. (Nota: cada leitura representa os valores lidos de todos os portos em cada intervalo de medição)
<i>dump –enum –new 65535</i>	Retorna o número de leituras não descarregadas em memória. Depois de descarregar dados da memória, esses dados podem ser marcados como lidos, com o comando “ <i>dump –write</i> ”.
<i>dump -write</i>	Marca todos os dados em memória até à hora actual como dados “lidos/d Descarregados”.
<i>dump –all [pack]</i>	Solicita o descarregamento de todos os dados em memória. Os dados são enviados sucessivamente em pacotes contendo um determinado número de leituras, definido por [pack].
<i>dump –new [pack]</i>	Solicita o descarregamento dos dados em memória que ainda não foram carregados. Os dados são enviados sucessivamente em pacotes contendo um determinado número de leituras, definido por [pack].
ack	Depois de identificado um pacote de dados válido este comando solicita o próximo pacote.
nack	Depois de identificado um pacote de dados inválido solicita o reenvio do mesmo pacote.

O descarregamento dos dados em memória do Em50 deverá ser feito enviando um comando que solicite dados (todos os dados ou dados novos, enviados em pacotes com um determinado tamanho). Na recepção de um pacote, com sucesso ou sem sucesso, é enviado o comando ack/nack, até que todos os dados requisitados sejam descarregados.